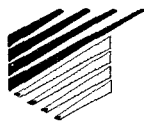


Ministère de l'Economie,
des Finances et de l'Industrie



Secrétariat
d'Etat à l'Industrie



DIRECTION DE L'ACTION REGIONALE ET
DE LA PETITE ET MOYENNE INDUSTRIE

SOUS-DIRECTION DE LA METROLOGIE

INCERTITUDES DE MESURAGE EN MATIERE DE JAUAGES

IDENTIFICATION

COFRAC : Document n° 2276
(Révision 00)
(Avril 1999)

SDM : Note n° 98.00.340.001,9
(Révision 2)



INCERTITUDES DE MESURAGE EN MATIERE DE JAUGEAGES

AVERTISSEMENTS : Le présent document présente les vues communes du COFRAC et de la sous-direction de la métrologie (SDM) en matière d'incertitudes de jaugeage.

Il ne prétend pas traiter le chapitre des incertitudes de façon exhaustive et parfaite.

I - GENERALITES

1.1 Il n'est pas de bonne métrologie (légale ou autre) sans une maîtrise des incertitudes de mesurage.

Cette considération doit également s'appliquer aux jaugeages de récipients-mesures.

Les organismes de jaugeage doivent donc démontrer qu'ils maîtrisent ce concept, y compris dès la demande d'agrément provisoire. Le dossier devra comprendre une analyse des causes d'incertitudes liées au matériel et méthodes utilisés et à leur mise en oeuvre.

Cependant, compte tenu de la diversité et parfois de la complexité des cas rencontrés en matière de jaugeage et, pour certaines applications, de l'initialisation des réflexions, il apparaît nécessaire de donner quelques orientations, parfois simplificatrices.

1.2 D'une façon générale, le calcul d'incertitudes doit être précédé d'une analyse du processus de détermination de la mesure afin d'apprécier et d'estimer, pour chaque étape, les causes d'incertitudes.

Une fois une cause identifiée, il convient d'en quantifier l'influence. Des orientations seront fournies par le Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure (dit le GUM).

Pour chaque cause d'incertitude, il convient en particulier de choisir le coefficient de réduction à l'incertitude-type, à savoir : la répartition de la variable est-elle gaussienne ou obéit-elle à une distribution trapézoïdale, rectangulaire ?...

Enfin en métrologie légale, il est d'usage, maintenant, de prendre le coefficient d'élargissement égal à 2. Dans tous les cas, le coefficient retenu doit être indiqué clairement, y compris dans les certificats de jaugeage. Les incertitudes données dans les arrêtés catégoriels s'entendent pour $k = 2$.

1.3 Le barème étant établi par la DRIRE, il n'est pas possible au demandeur d'établir la composante d'incertitude correspondante.

Conventionnellement on prendra pour incertitudes relatives maximales sur l'établissement du barème :

- pour les méthodes volumétriques (jauges, épalement) : $\pm 3 \times 10^{-4}$ pour toutes les formes,
- pour les méthodes géométriques :
 - bacs cylindriques verticaux : $\pm 1 \times 10^{-4}$
 - bacs sphériques : $\pm 2 \times 10^{-4}$
 - bacs cylindriques couchés : $\pm 3 \times 10^{-4}$

Le facteur de réduction à l'incertitude-type sera pris égal à 2.

1.4 Les barèmes doivent être établis compte tenu de toutes les influences ou les corrections raisonnablement estimables. Cependant, jusqu'à démonstration contraire ou instruction contraire, les **incertitudes** sur les influences ou corrections suivantes pourront être considérées incluses dans les valeurs données en 1.3 :

- influence des changements de forme,
- correction fonction des corps intérieurs ou extérieurs,
- correction liée à un toit ou écran flottant (répondant aux règles de l'art),
- correction liée aux déformations.

Les incertitudes données en 1.3 incluent également les approximations numériques.

1.5 Les dispositions de la circulaire n° 93.00.110.001.1 du 18 mars 1993 relative à l'utilisation de moyens d'étalonnage dans le domaine du mesurage statique ou dynamique de liquides sont à prendre en considération (document SDM).

II - JAUGEAGES PAR METHODES OPTIQUES

On trouvera ci-joint un exemple de cas (annexe A.1).

Le dossier devra notamment comprendre une étude de l'influence des déformations et des incertitudes de manipulation. L'étude ci-jointe montre que ces influences conditionnent principalement le résultat final.

En conclusion, toutes les procédures devraient prévoir une validation du calcul d'incertitude avant de quitter le site de mesurage.

Le dossier devra également comprendre, chaque fois que nécessaire, une analyse des influences du nombre de points de mesure sur la détermination d'un mesurande, par exemple, pour tenir compte des déformations du fond.

III - JAUGEAGES AU MOYEN DE JAUGES

Des considérations sur les procédures, les corrections à apporter au cours des opérations et sur les incertitudes sont données dans la circulaire n° 91.00.340.001.1 du 15 mars 1991 relative aux récipients-mesures utilisés pour le transport des produits liquides à la pression atmosphérique (document SDM).

Voir extraits ci-joints (Annexe A.4).

Il convient cependant de considérer que cette circulaire est antérieure au GUM et qu'elle suppose, concernant les incertitudes, que :

- tous les coefficients de réduction aux incertitudes-types étaient égaux à trois,
- le facteur d'élargissement était également égal à trois.

Ceci a amené à ne pas faire apparaître ces éléments pour une question de simplification de rédaction. Une actualisation du concept est donc nécessaire, compte tenu, notamment, de cet aspect.

On trouvera également des éléments dans la circulaire n° 93.00.110.001.1 du 18 mars 1993 relative à l'utilisation de moyens d'étalonnage dans le domaine du mesurage statique ou dynamique de liquides (document SDM).

IV - JAUGEAGES AU MOYEN D'UN GROUPE D'ÉPALEMENT

Les considérations données en III s'appliquent.

La circulaire n° 96.00.340.001.1 du 18 décembre 1996 relative aux récipients-mesures et aux organismes de jaugeage donne également des éléments sur les procédures, notamment le point 3.2.2 et l'annexe 4 (document SDM).

Aux incertitudes listées au point 1.5.3.1.2 de la circulaire du 15 mars 1991 précitée, il convient notamment d'ajouter celles liées à la répétabilité et aux dérives admises entre le moment où l'ensemble de mesurage est étalonné et le moment où un nouvel étalonnage devient nécessaire. Autrement dit, il convient de prendre en considération toutes les causes d'incertitudes sur la correction appliquée à partir de la courbe d'étalonnage (voir Annexe A.3).

On trouvera ci-joint un exemple de calcul d'incertitude pour une application différente, mais qui pourra donner une idée de la démarche à suivre (Annexe A.5), et un exemple de détermination des incertitudes applicable aux réservoirs à parois verticales (Annexe A.2).

NOTE : L'annexe A.5 est extraite d'un autre document émis par la SDM, mais elle doit être compréhensible en soi. Tout du moins pour l'analyse des causes d'incertitudes.

V - JAUGEAGES DE BACS FIXES

5.1 Hauteur minimale du barème

Pour les réservoirs de stockage fixes, le barème (réglementaire) est défini comme correspondant à la zone des hauteurs pour lesquelles les incertitudes de jaugeage sont satisfaites. Ceci doit conduire à une hauteur minimale pour le barème.

On trouvera ci-après les conséquences de ce concept.

5.2 Réservoirs munis de dispositifs de repérage internes

La norme NF M 08-020 "Prescriptions métrologiques générales des réservoirs de stockage fixes de liquides autres que les vins, le lait et les liquides cryogéniques" donne des indications en matière d'incertitudes.

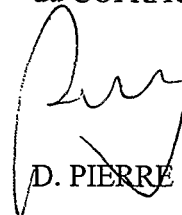
Fait à Paris, le **26 AVR 1999**

Pour le sous-directeur de la métrologie,
L'ingénieur en chef des instruments de mesure,



G. LAGAUTERIE

Le directeur
du COFRAC,



D. PIERRE

ANNEXE A.1**EXEMPLE DE CALCUL D'INCERTITUDE
APPLICABLE A LA METHODE PAR TRIANGULATION OPTIQUE
(ISO 7507-3)****METHODE PAR CEINTURAGE D'UNE VIROLE
D'UN BAC CYLINDRIQUE VERTICAL
ET VISEES OPTIQUES**

NOTES : La présente étude ne prétend pas à la perfection, mais se veut un élément essayant de traiter de façon approfondie les incertitudes de jaugeage de bacs.

Chaque demande d'accréditation ou demande d'agrément, même provisoire, doit être accompagnée de réflexions analogues, pour chaque méthode et chaque forme de bac.

Dans l'exemple ci-joint, on traite les incertitudes selon les deux aspects considérés par la réglementation applicable aux réservoirs de stockage munis de dispositifs internes de repérage des niveaux :

- incertitudes sur les volumes figurant sur le barème,
- incertitudes sur les volumes déterminés à partir de différences de volumes figurant sur barème, la réglementation imposant maintenant de déterminer les incertitudes maximales correspondant à un volume résultant d'une variation de niveau donnée.

On suppose que tous les matériels utilisés sont correctement ajustés et étalonnés et que toutes les corrections ont été faites.

On traite de façon conventionnelle les incertitudes liées à la présence éventuelle d'un toit ou écran flottant, de corps intérieurs ou extérieurs, ainsi que celles liées au gonflement (ce qui ne signifie pas qu'il ne faut pas en tenir compte au niveau du barème).

On néglige les covariances possibles.

I - INCERTITUDES SUR LES RAYONS DES VIROLES

Les incertitudes proviennent de trois causes que l'on supposera indépendantes :

- celles liées à la qualité intrinsèque des moyens d'essais,
- celles liées à la qualité des mesurages,
- celles liées aux déformations du bac.

On décide d'évaluer les incertitudes liées à la qualité intrinsèque des moyens d'essais selon le type B.

Les incertitudes expérimentales sur la détermination de la circonférence de la virole ceinturée sont également évaluées selon le type B, ainsi que celles liées à la détermination de l'épaisseur des tôles (incertitude sur le mesurage de l'épaisseur des tôles, influences des soudures, présence de peinture et de parties oxydées...).

Les incertitudes liées aux autres causes sont évaluées selon le type A. On considère que le nombre de résultats obtenus au cours du barèmage d'un bac, constitue une population suffisante de résultats pour traiter chaque virole de façon autonome.

Une analyse plus poussée, à partir de jaugeages d'un même bac effectués dans des conditions différentes, pourrait faire apparaître la nécessité de considérer des composantes supplémentaires (influence des conditions météorologiques, par exemple : contraste bac/ciel, température de l'air, pluie...).

1.1 Incertitudes évaluées selon le type B

Elles sont liées :

- à l'incertitude du ruban étalonné donnée par le certificat d'étalonnage,
- au moyen de repérage des angles (théodolite),
- aux incertitudes expérimentales sur la détermination de la circonférence de la virole ceinturée,
- à la connaissance de l'épaisseur des tôles.

1.1.1 Un rayon extérieur est donné par la formule :

$$r = \frac{C}{2\pi} \times \frac{\sin \alpha_i}{\sin \alpha}$$

Avec :

- C circonférence mesurée au moyen du ruban étalonné,
- α moitié de l'angle horizontal déterminé par deux visées au niveau du ceinturage,
- α_i moitié de l'angle horizontal déterminé par deux visées aux autres niveaux.

Les dérivées partielles sont :

$$\frac{\partial r}{\partial C} = \frac{1}{2\pi} \times \frac{\sin \alpha_i}{\sin \alpha}$$

Soit :

$$\frac{\partial r}{\partial C} = \frac{r}{C}$$

De même

$$\frac{\partial r}{\partial \alpha} = - \frac{r}{\tan \alpha}$$

$$\frac{\partial r}{\partial \alpha_i} = \frac{r}{\tan \alpha_i}$$

En toute rigueur, les termes en α et α_i doivent donner lieu à une covariance dans la formule donnant l'incertitude-relative. Une considération intuitive permet de s'en affranchir en ne retenant, comme composantes d'incertitude correspondantes, que celles relatives à l'incertitude de linéarité du théodolite.

Selon le GUM, l'incertitude-type absolue, évaluée selon le type B u_{Bra} , sur la détermination d'un rayon extérieur est donc donnée par :

$$u_{\text{Bra}}^2 = \left(\frac{1}{C^2} \times u_c^2 + \frac{1}{\text{tg}^2\alpha} \times u_\alpha^2 + \frac{1}{\text{tg}^2\alpha_i} \times u_{\alpha_i}^2 \right) \times r^2$$

Or, les deux termes en α et α_i sont sensiblement égaux ; d'où

$$u_{\text{Bra}}^2 = \left(\frac{1}{C^2} \times u_c^2 + \frac{2}{\text{tg}^2\alpha} \times u_\alpha^2 \right) \times r^2$$

Avec :

u_c : incertitude-type (absolue) sur la détermination de la circonférence ceinturée.

u_α : incertitude-type (absolue) de linéarité du théodolite

α : angle le plus défavorable (petit) du jaugeage.

L'incertitude-type absolue sur la détermination du rayon peut également s'exprimer sous les formes suivantes :

$$u_{\text{Bra}}^2 = \frac{u_c^2}{4\pi^2} + \frac{2r^2}{\text{tg}^2\alpha} u_\alpha^2$$

ou

$$u_{\text{Bra}}^2 = \frac{1}{4\pi^2} \left(u_c^2 + \frac{2C^2}{\text{tg}^2\alpha} u_\alpha^2 \right)$$

NOTE IMPORTANTE :

Au cours des opérations de jaugeages, les mesurages sont en principe répétés et l'on prend la moyenne des résultats pour les paramètres correspondant. Ceci pourrait amener à diviser certaines incertitudes-types évaluée selon le type B par la racine du nombre de mesurages. Il est suggéré de ne pas utiliser cette hypothèse, afin de compenser des erreurs de manipulations, les dispositions de la norme ISO 7507-3 en étant supposées exemptes.

1.1.2 Selon les modes opératoires recensés, il existe deux méthodes de relevés des circonférences au moyen d'une mesure de longueur (ruban) :

- lecture directe de la longueur au droit du repère zéro,
- lecture de la longueur à partir d'une origine choisie appropriée, en soustrayant la longueur jusqu'à cette origine.

Les deux méthodes ont leurs avantages et leurs inconvénients. La seconde fait intervenir deux incertitudes d'étalonnage, puisque la longueur résulte d'une différence.

Dans les deux cas, on considère que l'incertitude de lecture est celle donnée ci-après, bien qu'en toute rigueur le repérage au zéro paraisse plus délicat.

Dans le présent exemple, on effectue les lectures au droit du repère zéro.

On distingue trois composantes pour u_c :

- 1 - La composante d'incertitude I donnée par le certificat d'étalonnage, avec un coefficient $k = 2$ de réduction à l'incertitude-type, en général,

$$u_{CI} = \frac{I}{2}$$

- 2 - La composante d'incertitude de lecture. Soit L la valeur de l'échelon du ruban. Les commissions permanentes d'accréditation du COFRAC concernées considèrent que l'incertitude-type correspondante est :

$$u_{CL} = \frac{L}{2 \times 3^{1/2}}$$

Cette formule traduit une répartition uniforme sur un demi-échelon.

- 3 - La composante expérimentale donnée au tableau 4 de la norme ISO 7507-3, désignée par T ci-dessous. Par exemple, pour un bac de circonférence comprise entre 25 m et 50 m, on s'autorise une différence de 3 mm (intervalle maximal, à diviser par deux) entre les deux lectures. Ne connaissant pas la distribution, le coefficient de réduction à l'incertitude-type est pris égal à $3^{1/2}$ (distribution rectangulaire).

$$u_{CT} = \frac{T}{2 \times 3^{1/2}}$$

Il semble que l'on puisse s'autoriser à considérer que u_{CT} comprend notamment les composantes d'incertitudes suivantes :

- incertitude sur la tension d'utilisation de la mesure de longueur (ruban),
- incertitude sur la répartition de cette tension le long du ruban, au contact du bac (lubrification...),
- incertitude sur les coefficients de dilatation du ruban et du bac,
- incertitude sur les températures du ruban et du bac.

4 - L'incertitude-type absolue u_c sur la détermination de la circonférence est donc donnée par :

$$u_c^2 = u_{CI}^2 + u_{CL}^2 + u_{CT}^2$$

1.1.3 Pour ce qui concerne u_a , on considérera que la distribution est rectangulaire ($k = 3^{1/2}$). Si l'incertitude maximale de linéarité est a , l'incertitude-type associée est donc :

$$u_a = \frac{a}{3^{1/2}}$$

Note : dans l'exemple, on considère que l'incertitude de lecture est comprise dans ce terme.

1.1.4 Concernant la connaissance de l'épaisseur des tôles, on considère l'incertitude maximale E , et un facteur $k = 3$.

$$u_E = \frac{E}{3}$$

Cette incertitude est fonction de la façon dont l'épaisseur est évaluée : sur plan, par mesurage (ultrasons), de la qualité des revêtements des surfaces, et de la méthode de qualification du moyen de mesurage (sur place ou non).

1.1.5 La variance absolue sur le rayon intérieur u_{BRa}^2 est donc :

$$u_{BRa}^2 = u_{Bra}^2 + u_E^2$$

1.2 Incertitudes évaluées selon le type A

L'on se borne aux incertitudes liées, à la fois, aux visées et aux déformations, c'est-à-dire pour ce dernier point, par rapport au modèle géométrique.

NOTE : La méthode proposée ci-après intègre des composantes de déformations liées au fait que l'axe du bac peut être incliné. Ces composantes conduisent à une surestimation de la variance recherchée. L'inclinaison de l'axe d'un bac n'a pas une influence prépondérante sur la correspondance hauteur/volume. Cet aspect n'est pas traité, ce qui n'empêche pas les organismes de le faire, afin de mieux appréhender (minimiser) leur calcul d'incertitudes.

L'ensemble des déterminations des rayons d'une virole permet d'estimer l'écart-type expérimental pour cette virole. Cet écart-type expérimental s est donné par la formule :

$$s^2 = \frac{\sum (R_i - \bar{R})^2}{n - 1}$$

s^2 est la variance expérimentale des observations.

NOTE : Dans le cas où l'on déterminerait plusieurs paramètres aux moyens de mesures optiques, le nombre de degrés de liberté pour un paramètre serait égal au nombre de mesures correspondant à ce paramètre diminué du nombre total de paramètres déterminés.

Pour le calcul de l'incertitude-type associée, il faut multiplier cette estimation de la variance par deux pour tenir compte du fait que chaque mesure est représentative de deux rayons, et diviser par n, puisque l'on fait la moyenne des n résultats.

$$u_A^2 = \frac{2}{n} \times s^2$$

1.3 Incertainde

L'incertitude-type absolue sur la détermination du rayon est :

$$u_{Ra} = (u_{BRa}^2 + u_A^2)^{1/2}$$

En prenant un facteur d'élargissement égal à 2, l'incertitude élargie absolue est :

$$U_R = 2 u_{Ra}$$

L'incertitude-type absolue sur le rayon doit être calculée pour chaque virole.

II - INCERTITUDES SUR LES VOLUMES

Selon la définition du terme "barème", celui-ci ne peut donc être établi que pour les hauteurs pour lesquelles les incertitudes sur les volumes sont inférieures à l'incertitude maximale tolérée. En-deçà, un barème indicatif se distinguant clairement du barème (réglementaire) peut être donné.

On donne deux approches possibles aux points 2.1 et 2.2.

La première approche est générale et peut être mise en oeuvre quelle que soit la façon dont le volume du fond est déterminé. Elle permet de calculer l'incertitude sur tous les volumes du barème.

La seconde approche est plus particulière et devrait être réservée aux cas où, par empotement, on peut déterminer le volume du fond au ras de la plaque de touche.

Enfin au point 2.3 on s'intéresse aux incertitudes sur les déterminations de volumes par différence de deux volumes portés sur le barème (volumes déterminés par variation de niveaux).

2.1 Incertitudes sur les volumes du barème (méthode générale)

2.1.1 Virole du bas

En général, afin de mesurer le volume du fond (volume qui “noierait” le plus haut niveau correspondant à la plaque de touche et au sommet du fond), on passe par la détermination d’un volume à une hauteur supérieure à celle correspondant au plan de la surface du volume du fond.

Ce volume est ci-après appelé volume de référence et désigné par V_M ; il correspond à une hauteur h_t au-dessus de la plaque de touche.

V_M est déterminé avec une incertitude-type u_{V_M}
 h_t est déterminée avec une incertitude type u_{h_t} .

La détermination de ces deux incertitudes-types est propre à chaque méthode et ne fait pas l’objet de la présente étude. Elle doit être développée par les organismes de jaugeage.

Le volume théorique V à une hauteur h au-dessus de la plaque de touche est donné par :

$$V = V_M + \pi R^2 (h - h_t)$$

Note importante : Si le sommet du fond est au-dessus de la plaque de touche, cette formule n’a de sens que pour les hauteurs au-dessus de celle correspondant au niveau du volume du fond. De plus, les corrections ne sont pas considérées.

En particulier, pour la première virole, de rayon R_1 , on peut écrire :

$$V = V_M + \pi R_1^2 (h - h_t)$$

Les dérivées partielles sont :

$$\frac{\partial V}{\partial V_M} = 1$$

$$\frac{\partial V}{\partial R_1} = 2 \pi R_1 (h - h_t)$$

$$\frac{\partial V}{\partial h_t} = - \pi R_1^2$$

$\frac{\partial V}{\partial h}$ ne nous intéresse pas car dans la phrase d’établissement du barème, la hauteur est idéalement connue.

Dans la première virole, l'incertitude-type sur le volume u_v est donc donnée par :

$$u_v^2 = u_{VM}^2 + \pi^2 R_1^4 u_{ht}^2 + 4 \pi^2 R_1^2 (h - h_t)^2 u_{R1}^2$$

Pour simplifier l'écriture, on note ici u_{R1} ce qui correspondrait à l'incertitude-type u_{Ra} au point 1.3 ci-dessus, pour la virole du bas.

Sous réserve de vérifier l'influence, on peut envisager d'assimiler R_1 à R (rayon nominal, ou mieux, au rayon moyen), soit :

$$u_v^2 = u_{VM}^2 + \pi^2 R^4 u_{ht}^2 + 4 \pi^2 R^2 (h - h_t)^2 u_{R1}^2$$

2.1.2 Autres viroles que la première

On note :

- . H_i la hauteur de la virole i ,
- . h_i la différence de hauteur entre le dessus de la plaque de touche et le haut de la première virole,
- . H_T la hauteur du dessus de la plaque de touche par rapport au bas de la première virole.

On a :

$$H_1 = h_1 + H_T$$

Le volume au ras du sommet de la première virole est :

$$\begin{aligned} V_1 &= V_M + \pi R_1^2 (h_1 - h_t) \\ &= V_M + \pi R_1^2 (H_1 - H_T - h_t) \end{aligned}$$

Pour toute virole i intermédiaire, le volume V_i est :

$$V_i = \pi R_i^2 H_i$$

Pour la virole n (attention n n'a pas la même signification qu'au 1.2 ou il caractérise le nombre de stations) dans laquelle se trouve la surface du liquide, correspondant à une hauteur h , le volume est :

$$V_n = \pi R_n^2 \left(h + H_T - \sum_{i=1}^{n-1} H_i \right)$$

Le volume a une hauteur h (par rapport à la plaque de touche) est donc :

$$V = V_M + \pi R_1^2 (H_1 - H_T - h_t) + \sum_{i=2}^{n-1} \pi R_i^2 H_i + \pi R_n^2 \left(h + H_T - \sum_{i=1}^{n-1} H_i \right)$$

Les dérivées partielles sont :

$$\frac{\partial V}{\partial V_M} = 1$$

$$\frac{\partial V}{\partial R_1} = 2\pi R_1 (H_1 - H_T - h_t)$$

$$\frac{\partial V}{\partial R_i} = 2\pi R_i H_i ; \text{ pour } 1 < i < n$$

$$\frac{\partial V}{\partial R_n} = 2\pi R_n (h + H_T - \sum_{i=1}^{n-1} H_i)$$

$$\frac{\partial V}{\partial h_t} = -\pi R_1^2$$

$$\frac{\partial V}{\partial H_T} = -\pi(R_1^2 - R_n^2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial H_1} = \pi(R_1^2 - R_n^2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial H_i} = \pi(R_i^2 - R_n^2) ; \text{ pour } 1 < i < n$$

$$\frac{\partial V}{\partial h} \text{ ne nous intéresse pas au stade de l'élaboration du barème.}$$

Les termes en différence de carrés de rayons peuvent être négligés car les rayons sont proches les uns des autres. De plus, en assimilant R_i à R , l'incertitude-type absolue sur le

volume, pour toute hauteur h est donnée par :

$$\begin{aligned}
 u^2_v &= u^2_{VM} + \pi^2 R^4 u^2_{ht} && \text{(terme constant)} \\
 &+ 4 \pi^2 R^2 (H_1 - H_T - h_t)^2 u^2_{R1} && \text{(terme propre à la 1^{ère} virole)} \\
 &+ \sum_{i=2}^{n-1} 4 \pi^2 R^2 H_i^2 u^2_{Ri} && \text{(termes propres aux viroles intermédiaires)} \\
 &+ 4 \pi^2 R_n^2 \left(h + H_T - \sum_{i=1}^{n-1} H_i \right)^2 u^2_{Rn} && \text{(terme propre à la virole dans laquelle se} \\
 &&& \text{trouve la surface du liquide)}
 \end{aligned}$$

2.1.3 Incertitude relative sur le volume

En considérant que l'incertitude sur l'établissement du barème est conventionnellement donnée en 1.3 de la note générale, l'incertitude relative élargie sur le volume U est :

$$U = 2 \left[\left(\frac{u_v}{V} \right)^2 + u_b^2 \right]^{1/2}$$

Avec :

- u_v déterminé selon 2.1.1 ou 2.1.2 suivant la virole,
- V pouvant être pris égal à $V_M + \pi R^2 (h - h_t)$
- u_b incertitude-type relative conventionnelle sur l'établissement du barème égale à la moitié de la valeur donnée en 1.3 de la note générale ($u_b = 0,5 \times 10^{-4}$ pour un bac cylindrique vertical).

Comme indiqué en 1.4 de la note générale, on pourra considérer que cette composante comprend, pour ce qui concerne le logiciel de l'administration, seule référence réglementairement utilisable, les composantes liées :

- aux calculs (approximations, arrondissements...),
- aux corps extérieurs et intérieurs,
- au toit ou à l'écran flottant, le cas échéant,
- au gonflement du bac.

Il est rappelé qu'il s'agit des incertitudes après corrections, qui doivent être faites.

Un exemple de tableau des incertitudes en fonction de la hauteur est donné ci-après.

2.2 Cas particulier

Lorsque l'on a déterminé le volume du fond et s'il correspond au ras du haut de la plaque de touche, on peut adopter l'approche suivante :

1. Déterminer l'incertitude relative pour le volume de chaque virole en ne considérant que les incertitudes liées à la partie cylindrique (voir 2.2.1).

2. Déterminer la hauteur de départ du barème (voir 2.2.2).
3. S'assurer que le barème peut être établi dès la première virole.
4. S'assurer que pour toutes les viroles au-dessus de la première virole, l'incertitude relative propre à la partie cylindrique respecte l'exigence réglementaire.

2.2.1 Volume (dans la partie cylindrique)

Le volume dans la partie cylindrique est (sans tenir compte des corrections et aux incertitudes près) :

$$V = \pi R^2 h$$

Dans le cadre de l'établissement d'un barème, la hauteur est idéalement connue.

Il reste à considérer :

$$\frac{\partial V}{\partial R} = 2 \pi R h$$

L'incertitude-type absolue sur le volume est, en fonction de u_{Ra} (voir 1.3.1) :

$$u_{va} = 2 \pi R h u_{Ra}$$

L'incertitude-type relative sur le volume est :

$$u_{vr} = \frac{u_{va}}{V}$$

Soit :

$$u_{vr} = \frac{2}{R} \times u_{Ra}$$

Il faut également tenir compte de l'incertitude relative maximale donnée au point 1.3 de la note générale, correspondant à l'établissement du barème. Les valeurs données en 1.3 doivent être divisées par deux pour réduction à l'incertitude-type relative correspondante. Pour un bac cylindrique vertical :

$$u_b = 0,5 \times 10^{-4}$$

Finalement, l'incertitude relative élargie sur le volume d'une virole U_v est, en prenant un facteur d'élargissement égal à 2 :

$$U_v = 2 (u_{vr}^2 + u_b^2)^{1/2}$$

$$\text{Soit : } U_v = 2 \left(\frac{4}{R^2} u_{Ra}^2 + u_b^2 \right)^{1/2}$$

2.2.2 Détermination de la hauteur minimale d'un barème

Avertissement : La formule ci-après n'est valable que si le barème peut réglementairement être établi dès la première virole.

En général, le volume du fond est mesuré avec une incertitude supérieure à ce qui est possible pour la partie cylindrique, et supérieure à l'incertitude réglementaire.

NOTES : L'incertitude sur le volume du fond n'est pas développé dans la présente étude.

Pour cet exercice, on néglige l'incertitude sur la détermination du barème.

Compte tenu du fait que le barème ne doit être dressé que pour des hauteurs pour lesquelles l'incertitude maximale admise est respectée, ceci conduit à une hauteur minimale en-dessous de laquelle le barème ne peut être établi (un barème complémentaire différencié est possible, en-dessous de cette hauteur).

Le volume du bac à une hauteur h , à partir de la plaque de touche, est (en négligeant les corrections), compte tenu du volume du fond (jusqu'au niveau correspondant à $h = 0$) V_0 :

$$V = \pi R^2 h + V_0$$

D'où

$$dV = \pi R^2 dh + 2 \pi h R dR + dV_0$$

Dans la phase d'établissement du barème, la hauteur est idéalement sans incertitude. Il en serait différemment en exploitation.

La formule liant les différentes incertitude-types absolues est donc :

$$u_v^2 = 4\pi^2 R^2 h^2 u_{Ra}^2 + u_{v0}^2$$

L'incertitude-type relative sur le volume est donnée par :

$$\left(\frac{u_v}{V}\right)^2 = \frac{4\pi^2 R^2 h^2 u_{Ra}^2 + u_{v0}^2}{(V_0 + \pi R^2 h)^2}$$

Ceci donne une équation du second degré en h , dont la résolution donne pour solution utile :

$$h = V_0 \frac{-1 + \sqrt{1 + \left[1 - 4 \left(\frac{V}{u_v} \times \frac{u_{Ra}}{R}\right)^2\right] \left[\left(\frac{V}{u_v} \times \frac{u_{v0}}{V_0}\right)^2 - 1\right]}}{\pi R^2 \left[1 - 4 \left(\frac{V}{u_v} \times \frac{u_{Ra}}{R}\right)^2\right]}$$

Il est précisé que u_v/V est égal à la moitié de l'incertitude relative réglementairement tolérée.

2.3 Volumes par différence

Les nouvelles dispositions réglementaires prévoient des dispositions relatives aux incertitudes sur les volumes déterminés par “différence de niveaux”.

Les incertitudes maximales correspondant à la “livraison minimale” définie par la norme NF M 08-020 doivent figurer dans le certificat de jaugeage.

2.3.1 Soit h_{2t} et h_{1t} les hauteurs repérées à partir de la face supérieure de la plaque de touche, correspondant à deux niveaux de liquide établis dans la virole n pour le niveau supérieur et la virole j pour le niveau inférieur. On ne considère ci-après que le cas où les deux viroles sont différentes.

Les volumes correspondants sont respectivement :

$$V_2 = V_M + \pi R^2_1 (H_1 - H_T - h_t) + \sum_{i=2}^{n-1} \pi R^2_i H_i + \pi R^2_n (h_{2t} + H_T - \sum_{i=1}^{n-1} H_i) + V_{b2}$$

$$V_1 = V_M + \pi R^2_1 (H_1 - H_T - h_t) + \sum_{i=2}^{j-1} \pi R^2_i H_i + \pi R^2_j (h_{1t} + H_T - \sum_{i=1}^{j-1} H_i) + V_{b1}$$

Les termes V_{b1} et V_{b2} traduisent les corrections à apporter en fonction des déformations et autres influences.

Le volume entre les hauteurs h_{2t} et h_{1t} est :

$V = V_2 - V_1$; soit après regroupement de certains termes :

$$V = \sum_{i=j+1}^{n-1} \pi R^2_i H_i + \pi R^2_n (h_{2t} + H_T - \sum_{i=1}^{n-1} H_i) - \pi R^2_j (h_{1t} + H_T - \sum_{i=1}^j H_i) + V_{b2} - V_{b1}$$

En négligeant les dérivés partiels sous forme de différence de carrés de rayon, l'incertitude sur ce volume est alors :

$$u^2_V = 4 \pi^2 \left[R^2_j (h_{1t} + H_T - \sum_{i=1}^j H_i)^2 u^2_{Rj} + \sum_{i=j+1}^{n-1} R^2_i H^2_i u^2_{Ri} + R^2_n (h_{2t} + H_T - \sum_{i=1}^{n-1} H_i)^2 u^2_{Rn} \right]^{1/2} + u^2_{vb2} + u^2_{vb1}$$

Les termes u_{vbi} correspondent aux incertitudes de barémage et sont donnés par :

$$u_{vbi} = V_i \times u_b = \pi R^2_i h_i u_b$$

Note : L'incertitude de barémage n'a de sens que pour la partie cylindrique (barémée), le volume du fond n'est donc pas à prendre en considération pour la composante u_{vbi} , et d'autre part on peut supposer V_i égal à $\pi R^2_i h_i$.

Il vient donc :

$$1) \quad u_v^2 = 4 \pi^2 \left[R_j^2 (h_{1t} + H_T - \sum_{i=1}^j H_i)^2 u_{Rj}^2 + \sum_{i=j+1}^{n-1} R_i^2 H_i^2 u_{Ri}^2 + R_n^2 (h_{2t} + H_T - \sum_{i=1}^{n-1} H_i) u_{Rn}^2 \right]^{1/2} + \pi^2 R^4 (h_{1t}^2 + h_{2t}^2) u_b^2$$

L'incertitude relative élargie est alors :

$$U = 2 \frac{u_v}{V}$$

$$\text{Avec } V = \pi R^2 (h_{2t} - h_{1t})$$

La formule 1) peut être exploitée au moyen d'un tableur de façon à déterminer l'incertitude maximale sur la détermination de volumes correspondant à la "livraison minimale".

2.3.2 On peut cependant simplifier l'exercice en recherchant des majorants appropriés pour u_v .

Dans un premier temps, on peut assimiler R_i à R (rayon moyen ou le plus grand). Ensuite remarquons que :

$$0 \leq |h_{1t} + H_T - \sum_{i=1}^j H_i| \leq H_j$$

et

$$0 \leq h_{2t} + H_T - \sum_{i=1}^{n-1} H_i \leq H_n$$

Ceci traduit que les niveaux sont dans les viroles considérées.

On a alors :

$$u_v^2 \leq 4 \pi^2 R^2 \sum_{i=j}^n H_i^2 u_{Ri}^2 + \pi^2 R^4 u_b^2 (h_{1t}^2 + h_{2t}^2) \quad 2)$$

L'exploitation de la formule 2) donnerait pour incertitude relative élargie

$$U = 2 \frac{[4 \sum_{i=j}^n H_i^2 u_{Ri}^2 + R^2 (h_{2t}^2 + h_{1t}^2) u_b^2]^{1/2}}{R(h_{2t} - h_{1t})}$$

Avec $h_{2t} - h_{1t} = h_m$ (hauteur correspondant à la livraison minimale).

Là encore l'utilisation d'un tableur serait utile.

2.3.3 Par ailleurs, soit u_{RM} le majorant des incertitudes-types absolues sur le rayon. Enfin, si toutes les viroles ont la même hauteur nominale ou si l'on prend pour H_i la plus grande hauteur des viroles (H), on peut écrire :

$$u_v^2 \leq 4\pi^2 R^2 H^2 (n-j+1) u_{RM}^2 + \pi^2 R^4 u_b^2 (h_{1t}^2 + h_{2t}^2) \quad 3)$$

L'utilisation de la formule 3) conduirait à ce que l'incertitude relative élargie maximale soit obtenue pour h_{2t} égale à la hauteur maximale figurant sur le barème.

$$U = 2 \frac{[4(n-j+1)H^2 u_{RM}^2 + R^2(h_{2t}^2 + h_{1t}^2) u_b^2]^{1/2}}{R(h_{2t} - h_{1t})}$$

2.3.4 On peut également avoir une approche plus ponctuelle considérant les caractéristiques de construction et les résultats obtenus, afin de trouver le résultat que fournirait la formule 1 sans utiliser de tableur.

Il convient, dans ce cas de bien analyser l'ensemble des cas, pour obtenir l'incertitude maximale.

Voir application numérique ci-après.

RECAPITULATIF DES FORMULES POUR UN BAC CYLINDRIQUE VERTICAL
INCERTITUDE ELARGIE SUR LE RAYON D'UNE VIROLE

NOTE : en toute rigueur, il conviendrait de considérer à part le cas de la virole ceinturée.

Incertitude élargie absolue

$$U_R = 2u_{Ra}$$

Incertitude élargie relative

$$\frac{U_R}{R} = 2 \frac{u_{Ra}}{R}$$

Avec (voir le texte pour la signification des abréviations non explicitées)

$$u_{Ra}^2 = \frac{1}{4\pi^2} (u_{CI}^2 + u_{CL}^2 + u_{CT}^2) + \frac{2R^2}{\text{tg}^2\alpha} u_{\alpha}^2 + u_E^2 + \frac{2\sum(R_i - R)^2}{n(n-1)}$$

u_{CI} incertitude-type du ruban étalonné

$$u_{CI} = \frac{I}{2}$$

u_{CL} incertitude-type de lecture du ruban

$$u_{CL} = \frac{L}{2 \times 3^{1/2}}$$

u_{CT} incertitude-type sur les ceinturages

$$u_{CT} = \frac{T}{2 \times 3^{1/2}}$$

u_E incertitude-type sur l'épaisseur des tôles

$$u_E = \frac{E}{3}$$

u_{α} incertitude-type de linéarité du théodolite

$$u_{\alpha} = \frac{a}{3^{1/2}}$$

α demi-angle de visée le plus petit

R_i détermination i du rayon pour la virole considérée

\bar{R} rayon moyen de la virole considérée

n nombre de rayons déterminés pour la virole considérée (nombre de stations multiplié par 2 car les visées sont effectuées à deux niveaux par virole).

INCERTITUDES SUR LE BARÈME

Virole du bas

$$u^2_v = u^2_{VM} + \pi^2 R^4 u^2_{ht} + 4 \pi^2 R^2 (h - h_t)^2 u^2_{R1}$$

Autres viroles

$$u^2_v = u^2_{VM} + \pi R^4 u^2_{ht} + 4 \pi^2 R^2 (H_1 - H_T - h_t)^2 u^2_{R1} + \sum_{i=2}^{n-1} 4 \pi^2 R^2 H_i^2 u^2_{Ri} + \pi^2 R_n^2 (h + H_T - \sum_{i=1}^{n-1} H_i)^2 u^2_{Rn}$$

Avec :

u_{VM} incertitude-type sur le volume de référence

u_{ht} incertitude-type sur le repérage par rapport à la plaque de touche du niveau correspondant à ce volume

R longueur nominale (ou moyenne) des rayons du bac (ou le plus grand)

u_{Ri} incertitude-type absolue sur le rayon interne i (de 1 à n)

H_i hauteur de la virole i (de 1 à $n - 1$)

H_T hauteur de la face supérieure de la plaque de touche au bas de la virole du bas

h_t hauteur correspondant au volume de référence repérée à partir de la plaque de touche

h hauteur du liquide repérée à partir de la plaque de touche

Incetitude relative élargie sur le barème :

$$U_v = 2 \left[\left(\frac{u_v}{V} \right)^2 + u_b^2 \right]^{1/2}$$

**INCERTITUDE RELATIVE ELARGIE SUR LE VOLUME
DANS UNE VIROLE**

$$U_v = 2 \left(\frac{4}{R^2} \times u_{Ra}^2 + u_b^2 \right)^{1/2}$$

Avec :

R longueur nominale du rayon

u_b incertitude-type sur l'établissement du barème

HAUTEUR DE DEBUT DU BAREME

$$h = V_0 \frac{-1 + \sqrt{1 + \left[1 - 4 \left(\frac{V}{u_v} \times \frac{u_{Ra}}{R} \right)^2 \right] \left[\left(\frac{V}{u_v} \times \frac{u_{V0}}{V_0} \right)^2 - 1 \right]}}{\pi R^2 \left[1 - 4 \left(\frac{V}{u_v} \times \frac{u_{Ra}}{R} \right)^2 \right]}$$

Avec :

V_0 volume du fond

R longueur nominale du rayon du bac

$\frac{u_{V0}}{V_0}$ incertitude-type relative sur le volume du fond

$\frac{u_v}{V}$ incertitude-type relative maximale réglementaire (moitié de l'incertitude réglementaire)

$\frac{u_{Ra}}{R}$ incertitude-type relative sur la longueur du rayon de la première virole

Note : Formule valable sous conditions (voir texte)

**INCERTITUDE RELATIVE ELARGIE SUR LES VOLUMES
DETERMINEES PAR VARIATION DE NIVEAUX**

Compte tenu de la diversité des cas, les formules ne sont pas reprises ici (voir le texte).

APPLICATIONS NUMERIQUES

Soit un bac cylindrique vertical de rayon $R = 12$

Les données expérimentales sont :

Incertitude donnée par le certificat d'étalonnage du ruban pour $k = 2$:

$$I = \pm 1 \text{ mm}$$

NOTE : La plupart des certificats d'étalonnage sont donnés avec une incertitude meilleure, mais le calcul ci-après montre que ce n'est pas nécessaire

Echelon de lecture du ruban :

$$L = \pm 1 \text{ mm}$$

Incertitude (tolérance) donnée par le tableau 4 de la norme ISO 7507-3 :

$$T = 5 \text{ mm}$$

Nombre de stations donné par la norme ISO 7507-3, tableau 2 :

$$m = 6$$

Nombre de mesurages du rayon correspondant par virole :

$$n = 12$$

Ecart-type expérimental sur la mesure du rayon d'une virole :

$$s = 5 \text{ mm}$$

NOTE : Dans la pratique, l'écart-type peut aller de quelques millimètres à quelques centimètres (voir point 1.2 de la norme ISO 7507-3)

Demi-angle de visée minimal :

$$\alpha = 10 \text{ gon}$$

Défaut de linéarité du théodolite :

$$a = 1 \times 10^{-3} \text{ gon}$$

Incertitude maximale sur l'épaisseur des tôles :

$$E = 1 \text{ mm}$$

1 - Incertitudes-types élémentaires :

. étalonnage du ruban

$$u_{CI} = \frac{I}{2} = 0,5 \text{ mm}$$

. lecture du ruban

$$u_{CL} = \frac{L}{2 \times 3^{1/2}} = 0,29 \text{ mm}$$

. tolérance entre résultats (5 mm)

$$u_{CT} = \frac{T}{2 \times 3^{1/2}} = \frac{5}{2 \times 3^{1/2}} \text{ mm} = 1,44 \text{ mm}$$

. linéarité du théodolite (à convertir en radians : $1 \text{ gon} = \frac{\pi}{200} \text{ rad}$)

$$u_a = \frac{a}{3^{1/2}} = \frac{\pi \times 10^{-5}}{2 \times 3^{1/2}} = 9 \times 10^{-6} \text{ rad}$$

. épaisseur des tôles

$$u_E = \frac{E}{3} = \frac{1}{3} = 0,33 \text{ mm}$$

2 - Incertitude sur le ceinturage :

$$u_C^2 = [0,5^2 + 0,29^2 + 1,44^2] = 0,25 + 0,08 + 2,07$$

$$u_C^2 = 2,40$$

A titre indicatif, l'incertitude-type correspondante sur la circonférence est $u_C = 1,55 \text{ mm}$, ce qui correspond, pour le ceinturage et $k = 2$, à une incertitude élargie égale à $3,1 \text{ mm}$.

3 - Incertitude sur le rayon de la virole

NOTE : le calcul de l'incertitude absolue sur le rayon doit être effectué pour chaque virole.

$$\begin{aligned} u_{Ra}^2 &= \frac{2,40}{4 \times \pi^2} + \frac{2 \times 144}{0,02509} \times \frac{\pi^2 \times 10^{-4}}{4 \times 3} + \left(\frac{1}{3}\right)^2 + \frac{2 \times 5^2}{12} \\ &= 0,0608 + 0,9441 + 0,1111 + 4,1667 \\ &= 5,2827 \end{aligned}$$

L'incertitude-type absolue retenue sur le rayon est donc :

$$u_{Ra} = 2,30 \text{ mm}$$

NOTE : Le présent exercice montre l'importance de l'incertitude expérimentale et la faible contribution du ceinturage, des mesures optiques et de l'épaisseur des tôles. En conclusion, l'incertitude sur le rayon ne peut être évaluée correctement qu'après chaque opération de jaugeage.

L'incertitude relative élargie sur le rayon est donc :

$$\frac{U_R}{R} = \frac{2 \times 2,30}{12} \times 10^{-3} = 3,833 \times 10^{-4}$$

L'incertitude retenue est :

$$\frac{U_R}{R} = 3,83 \times 10^{-4}$$

4 - Incertitude relative élargie sur le volume

La contribution de la virole à l'incertitude relative sur le volume est :

$$\begin{aligned} U_V &= 2 \times \left[\frac{4 \times 5,2827 \times 10^{-6}}{144} + 0,5^2 \times 10^{-8} \right]^{1/2} \\ &= 2 \times [14,68 \times 10^{-8} + 0,25 \times 10^{-8}]^{1/2} \\ &= 2 \times 10^{-4} \times 14,93^{1/2} \end{aligned}$$

Soit l'incertitude retenue :

$$U_V = 7,73 \times 10^{-4}$$

5 - Incertitude relative élargie sur un volume déterminée par variation de niveaux

5.1 Application de la formule 3 de 2.3.3

Les données complémentaires nécessaires sont :

$$H = 1,5 \text{ m}$$

$$u_{RM} = 4 \text{ mm}$$

$$h_{2t} \text{ max} = 9 \text{ m}$$

$$h_{2t} - h_{1t} = 2 \text{ m}$$

La hauteur des viroles fait que $n - j + 1 = 3$

D'où :

$$U = \frac{2 [4 \times 3 \times 1,5^2 \times 4^2 \times 10^{-6} + 12^2 (9^2 + 7^2) \times 5^5 \times 10^{-10}]^{1/2}}{12 \times 2}$$

$$U = \frac{(432 + 46,8)^{1/2} \times 10^{-3}}{12}$$

Soit $U = 1,8 \times 10^{-3}$

5.2 L'analyse suggérée en 2.3.4 montre que les majorations évoquées aux points 2.3.2 et 2.3.3 peuvent être excessives.

Admettons que u_R soit égale à 4 mm pour les deux viroles du haut. En assimilant R à R, la formule 1) de 2.3.1 peut être (presque) strictement appliquée pour les conditions suivantes :

- la virole du haut est remplie pour le niveau haut du liquide,
- il n'y a pas de virole intermédiaire à considérer,
- l'avant dernière virole est remplie sur 1 m pour le niveau bas (la hauteur utile à considérer pour cette virole est 0,5 m).

L'application (presque) stricte de la formule 1) donnerait :

$$U = \frac{[4(1,5^2 + 0,5^2)4^2 \times 10^{-6} + 46,8 \times 10^{-6}]^{1/2}}{12}$$

Soit $U = 1,2 \times 10^{-3}$.

données expérimentales

incertitude donnée pour le ruban (k=2, en mm)
incertitude donnée pour la lecture du ruban (k=2*3^1/2, en mm)
incertitude maximale sur l'épaisseur des tôles (k=3, en mm)
défaut de linéarité du théodolite (en gon)
demi-angle de visé minimal (en gon)
incertitude-type sur l'établissement du barème (k=2)

l = 1
L = 1
E = 1
a = 0,001
alpha = 10
= 1E-04

INCERTITUDES RELATIVES SUR LE RAYON
EN FONCTION DE L'ECART-TYPE EXPERIMENTAL (1)

données dépendant du récipient barémé

Table with 19 columns representing measurements (rayon R, circonférence C, tolérance T, nbre de mesurages n) and 19 rows representing different experimental runs.

écart-type exp. (mm)

Incertitude relative sur le rayon

Main data table for the first set of experiments, showing relative uncertainty values for 25 different runs.

données dépendant du récipient barémé

Table with 19 columns representing measurements (rayon R, circonférence C, tolérance T, nbre de mesurages n) and 19 rows representing different experimental runs.

écart-type exp. (mm)

Incertitude relative sur le rayon

Main data table for the second set of experiments, showing relative uncertainty values for 25 different runs.

(1) les écarts-types expérimentaux sur le rayon dans la colonne de gauche sont bruts (ils correspondent à s dans le texte).

ANNEXE A.2

**EXEMPLE DE CALCUL D'INCERTITUDE
APPLICABLE A LA METHODE PAR TRANSVASEMENT DE LIQUIDE**

**JAUGEAGE D'UN RESERVOIR VERTICAL FIXE EQUIPE D'UN DISPOSITIF
EXTERNE DE REPERAGE DES NIVEAUX, AU MOYEN D'UN GROUPE
D'ÉPALEMENT**

NOTES : La présente étude ne prétend pas à la perfection, mais se veut un élément essayant de traiter de façon approfondie les incertitudes de jaugeage de cuves.

Chaque demande d'accréditation ou demande d'agrément, même provisoire, doit être accompagnée de réflexions analogues, pour chaque méthode et chaque forme de cuve.

On se propose d'estimer les incertitudes de jaugeage d'un réservoir vertical fixe équipé d'un dispositif externe de repérage des niveaux, au moyen d'un groupe d'épalement, ayant lui-même, après étalonnage, une incertitude donnée. L'évaluation de cette dernière incertitude ne fait pas l'objet du présent exemple et, il convient de se reporter aux parties pertinentes de ce document, pour ce faire.

L'exemple concerne toute cuve dont les parois sont verticales (sans changement de forme). Certaines valeurs numériques peuvent être adaptées à la constitution de la cuve, notamment pour ce qui concerne les aspects sur la déformation.

On suppose que tous les matériels utilisés sont correctement ajustés et étalonnés et que toutes les corrections ont été faites. La règle millimétrique est de classe II.

On néglige les covariances possibles.

I - ANALYSE

Les incertitudes expérimentales proviennent :

- de l'ensemble de mesurage (groupe d'épalement),
- du repérage des niveaux lors du jaugeage,
- des défauts de linéarité liées à la qualité de la règle millimétrique et aux déformations de la cuve, qui ont une incidence en un point quelconque de l'échelle.

Attention, les incertitudes liées au troisième tiret ci-dessus ne sont pas liées à l'exploitation du réservoir, mais sont dues à la différence de "linéarité" entre le barème (bien que l'algorithme de barèmage ne soit pas strictement linéaire) et la règle millimétrique, qui contrairement aux réservoirs avec dispositif de repérage interne, fait partie de l'instrument, le phénomène étant amplifié par les déformations possibles.

L'exemple ci-après ne fait intervenir que des incertitudes évaluées selon le type B.

II - INCERTITUDES ELEMENTAIRES

2.1 Ensemble de mesurage

Soit u_m l'incertitude-type de l'ensemble de mesurage. En général cette incertitude est donnée en valeur relative.

L'incertitude -type absolue pour un volume V (incluant l'incertitude sur la correction) est donc :

$$u_v = V \times u_m$$

Ce qui suit doit être adapté si l'incertitude absolue est de la forme $A + BV$.

2.2 Repérage des niveaux lors du jaugeage

Lorsque l'on repère un niveau sur la règle millimétrique, les sources d'incertitudes sont liées à :

- l'erreur de la règle,
- l'existence éventuelle de raccordements entre les éléments de la règle,
- l'incertitude de repérage à proprement parler,
- l'inclinaison du réservoir.

2.2.1 Linéarité de la règle

En général, les règles utilisées ne sont pas étalonnées, mais sont des mesures de longueur appartenant à une classe métrologique réglementaire. Ce qui suit doit être adapté dans le cas d'une mesure de longueur étalonnée avec des incertitudes données. (Il est rappelé qu'une erreur non prise en considération en utilisation conduit à une incertitude).

Par ailleurs, en toute rigueur, ce ne sont pas les erreurs de la règle qui nous intéressent en l'occurrence, mais les écarts de linéarité. Malheureusement, la réglementation applicable aux mesures de longueur ne fournit pas de données à ce sujet.

Sauf à établir une autre règle, on adoptera la règle empirique ci-après :

- l'incertitude élargie nous intéressant est prise égale à l'erreur maximale tolérée (emt) prévue pour la classe métrologie considérée,
- toutefois, la longueur (L) à considérer est prise égale à la différence de hauteur entre les deux niveaux de repérage (1), et non pas égale à la hauteur pour chaque repérage.

Ainsi si deux repérages ont lieu aux hauteurs h_1 (supérieure) et h_0 (inférieure), nous prenons :

$$L = h_1 - h_0 \quad (1).$$

Il est rappelé que pour une mesure de longueur de classe II, l'emt, en mm et en plus ou en moins pour une longueur donnée, est :

$$\text{emt} = 0,3 + 0,2 L$$

L est la valeur numérique de la longueur exprimée en mètres, arrondie à l'entier supérieur.

Ceci conduit, pour la classe II et pour h_0 ($L = 0$) à $u_{Lh_0} = 0,15$ mm.

Le respect de la réglementation pouvant impliquer un tri de la production, il ne faut pas prendre $k = 3$; $k = 2$ semble une valeur réaliste.

L'incertitude-type sur la linéarité d'un élément de la règle est alors :

$$u_L = \frac{\text{emt}}{2}$$

2.2.2 La règle peut être constituée de plusieurs éléments. Chaque raccordement doit se faire à mieux que 0,5 mm.

Cette valeur maximale peut être retenue, le coefficient étant alors pris égale à $3^{1/2}$ (distribution rectangulaire).

La variance correspondante est alors pour n raccords (n + 1 éléments) pour l'intervalle de la règle considéré :

$$u_R^2 = \frac{n}{3} \times 0,5^2 = \frac{0,25 n}{3}$$

2.2.3 Incertitude sur le repérage du niveau

On considère que l'incertitude maximale de lecture (repérage du niveau) est égale à deux millimètres, avec $k = 3$. L'incertitude-type correspondante est :

$$u_d = \frac{2}{3} \text{ mm}$$

NOTE : la règle donnée au 2 du point 1.1.2 de l'annexe A.1 n'est pas reprise car il ne s'agit pas d'une simple lecture de mesure de longueur, d'autres phénomènes (repérage du ménisque, stabilité des niveaux) entrant en ligne de compte).

2.2.4 Inclinaison du réservoir

Pour une cuve scellée au sol, si l'inclinaison du réservoir est **absolument** constante quel que soit le niveau du liquide dans le réservoir, il n'y a pas lieu de tenir compte de cette composante d'incertitude.

Pour ces cuves trois approches sont possibles :

1) Si la condition ci-dessus est respectée ne pas tenir compte de cette composante.

Toutefois, cette approche n'est pas autorisée au titre des dispositions transitoires, auquel cas il convient de se référer à a) ci-dessous.

2) Si l'on ne relève pas les différentes positions de l'organe indicateur du dispositif de repérage de la position de référence au cours du jaugeage (ce qui ne dispense pas de devoir vérifier cette stabilité au cours du jaugeage) ou si ce dispositif ne satisfait qu'aux exigences minimales, il convient de prendre en considération les dispositions minimales réglementaires (voir a) ou c) ci-après).

3) Si l'on relève les différentes positions de cet organe indicateur, on peut prendre en considération la position extrême relevée dans les conditions données en b).

Pour les cuves amovibles, bien que les incertitudes de jaugeage n'incluent pas les incertitudes d'exploitation, il convient, selon le cas, d'opter systématiquement soit pour l'approche donnée en a), soit pour l'approche donnée en c) ci-dessous.

Une inclinaison non constante de la cuve provoque une incertitude sur le repérage, en ce sens qu'elle associe un volume "erroné" à un niveau repéré, provoquant des incertitudes d'interpolation pour les hauteurs intermédiaires.

La réglementation prévoit deux types d'exigences, selon que le réservoir est amovible ou scellé au sol.

Lorsqu'il est amovible, l'organe indicateur du dispositif de repérage de la position de référence doit se déplacer de 4 mm (au moins) pour une variation de 1 mm du niveau du liquide. Le déplacement minimal est de 2 mm pour un réservoir scellé et pour une même variation du niveau.

a) On prendra comme incertitude maximale sur la hauteur, liée à l'inclinaison, 2 mm chaque fois que le dispositif de repérage n'offre pas une sensibilité au moins égale à celle exigée par la réglementation (cas des dispositions transitoires).

b) Si cette sensibilité est meilleure que celle prévue par la réglementation et si on relève le déplacement maximal de l'organe indicateur du dispositif de repérage de la position de référence, on pourra prendre, la variation de niveau correspondant à ce déplacement maximal observé pendant le jaugeage (voir exemple ci-après).

- c) Si cette sensibilité satisfait à l'exigence réglementaire minimale ou si l'on ne relève pas les variations, l'incertitude maximale sur le repérage des niveaux est prise égale à 1 mm.

La variation maximale de niveau (en mm) est appelée N. Elle est donc inférieure ou égale à 2 mm. Dans tous les cas, le coefficient est pris égal à $3^{1/2}$.

L'incertitude-type correspondante est :

$$u_i = \frac{N}{3^{1/2}} \leq \frac{2}{3^{1/2}} \text{ mm}$$

Par exemple, dans le cas d'une cuve à parois verticales (présentant les symétries nécessaires), de largeur l (selon l'orientation considérée), équipée d'un fil à plomb de longueur L, la variation de hauteur correspondant à un déplacement i du plomb est :

$$N = \frac{i \times l}{2 \times L}$$

2.3 Défauts de linéarité

Pour tout volume lu sur le barème pour le niveau relevé sur la règle on a des incertitudes liées :

- au défaut de linéarité de la règle,
- au défaut de linéarité du récipient engendré par les déformations.

2.3.1 Linéarité de la règle

La règle donnée en 2.2.1 peut être appliquée au repérage de toute hauteur h intermédiaire :

prendre alors $L = h - h_0$ (valeur en m, arrondie à l'entier supérieur) et $k = 2$.

$$u_L = \frac{emt}{2}$$

Toutefois, pour simplifier on pourra prendre, comme pour le tableau ci-après, pour tout h :

$$u_L = \frac{u_{Lh_0} + u_{Lh_1}}{2}$$

2.3.2 Déformations de la cuve

Sauf démonstration du contraire, on pourra estimer que pour une cuve susceptible de présenter des déformations moyennes, le défaut de linéarité maximal engendré par les déformations est égal à 0,5 mm. Cette valeur doit être modulée en fonction de la rigidité du matériau et de l'infrastructure de la cuve. Soit F la valeur retenue. On prendra $k = 3^{1/2}$.

L'incertitude-type correspondante est :

$$u_f = \frac{F}{3^{1/2}}$$

Avec, dans le cas général :

$$u_f = \frac{0,5}{3^{1/2}} \text{ mm}$$

Note : une autre façon de traiter les déformations pourrait consister à considérer la déformation maximale observée, en volume, pour un type de cuve. Il est rappelé que la stabilité dimensionnelle peut être vérifiée par la reproductibilité de mesurages, les résultats ne devant pas différer de plus de 1,5 pour mille, mais que cette valeur comprend les incertitudes de reproductibilité de l'ensemble de mesurage lui-même.

III - CALCUL D'INCERTITUDE

3.1 Soit :

- V_0 le volume correspondant au niveau h_0
- V_1 le volume correspondant au niveau h_1 , avec $h_1 > h_0$
- V le volume correspondant au niveau h compris entre h_0 et h_1 .

Le volume idéal V à la hauteur h , pour une cuve à parois verticales, est :

$$V = V_0 + \frac{(V_1 - V_0)(h - h_0)}{h_1 - h_0}$$

ou

$$V = \frac{V_0(h_1 - h) + V_1(h - h_0)}{h_1 - h_0}$$

Attention ceci n'indique pas que cette formule est suffisante pour l'algorithme de barèmage, mais elle peut être considérée suffisante pour le calcul d'incertitude.

Les dérivées partielles sont :

$$\frac{\partial V}{\partial V_0} = \frac{h_1 - h}{h_1 - h_0}$$

$$\frac{\partial V}{\partial V_1} = \frac{h - h_0}{h_1 - h_0}$$

$$\frac{\partial V}{\partial h_0} = \frac{(V_1 - V_0)(h - h_1)}{(h_1 - h_0)^2}$$

$$\frac{\partial V}{\partial h_1} = \frac{(V_0 - V_1)(h - h_0)}{(h_1 - h_0)^2}$$

$$\frac{\partial V}{\partial h} = \frac{V_1 - V_0}{h_1 - h_0}$$

Les incertitudes-types absolues des variables de la formule sont notées respectivement :

u_{V_0} , u_{V_1} , u_{h_0} , u_{h_1} et u_h .

En négligeant les covariances l'incertitude-type absolue est :

$$u_V^2 = \left(\frac{h_1 - h}{h_1 - h_0}\right)^2 u_{V_0}^2 + \left(\frac{h - h_0}{h_1 - h_0}\right)^2 u_{V_1}^2 + \left(\frac{(V_1 - V_0)(h - h_1)}{(h_1 - h_0)^2}\right)^2 u_{h_0}^2 + \left(\frac{(V_0 - V_1)(h - h_0)}{(h_1 - h_0)^2}\right)^2 u_{h_1}^2 + \left(\frac{V_1 - V_0}{h_1 - h_0}\right)^2 u_h^2$$

Dans le cas d'une incertitude de l'ensemble de mesurage proportionnelle au volume mesuré, on a :

$$u_{V_0} = V_0 u_m$$

$$u_{V_1} = V_1 u_m$$

La formule peut alors s'écrire :

$$u_V^2 = \frac{(V_0^2(h_1 - h)^2 + V_1^2(h - h_0)^2)u_m^2}{(h_1 - h_0)^2} + \left(\frac{(V_1 - V_0)(h - h_1)}{(h_1 - h_0)^2}\right)^2 u_{h_0}^2 + \left(\frac{(V_0 - V_1)(h - h_0)}{(h_1 - h_0)^2}\right)^2 u_{h_1}^2 + \left(\frac{V_1 - V_0}{h_1 - h_0}\right)^2 u_h^2$$

- 3.2 Le fait de négliger les covariances, qui existent certainement, doit conduire à une majoration de l'incertitude réelle.

En effet, si l'on considère les incertitudes élémentaires les sources de covariances sont nombreuses :

- on utilise la même règle qui peut avoir une composante d'erreur systématique pour repérer tous les niveaux,
- si le bac est relativement stable pendant le jaugeage les incertitudes liées à l'inclinaison doivent partiellement se compenser,
- si l'incertitude de l'ensemble de mesurage résulte plus de sources répétitives qu'aléatoires (bien qu'inconnues évidemment), celles-ci doivent se compenser partiellement.

Par contre, comme dans les formules, les termes respectivement en hauteurs et en volumes apparaissent sous forme de différences, on doit obtenir une majoration du résultat.

Il n'est évidemment pas interdit de parfaire l'étude présentée ici.

- 3.3 Les incertitudes-types composées, pour ce qui concerne les repérages de niveaux, sont données par :

Pour h_0 :

$$u_{h_0}^2 = u_L^2 + u_d^2 + u_i^2$$

Il n'y a pas lieu de retenir de composante u_R .

Pour h_1 :

$$u_{h_1}^2 = u_L^2 + u_R^2 + u_d^2 + u_i^2$$

Le nombre de raccordements entre les deux niveaux est à prendre en considération pour u_R .

Pour h :

$$u_h^2 = u_L^2 + u_f^2$$

Pour simplifier et compenser les probables majorations du fait de ne pas considérer les covariances, on ne retient pas de composante u_R ou u_i pour h .

NOTE : les composantes u_d et u_i interviendraient en exploitation.

3.4 L'incertitude-type relative liée aux opérations de mesurage est :

$$u_{Vr} = \frac{u_v}{V}$$

Il reste à considérer l'incertitude-type de barèmage u_b prise égale à la moitié de la valeur donnée au point 1.3 de la note introductive générale.

L'incertitude relative élargie pour un volume V est donc :

$$U_v = 2 \times [u_{Vr}^2 + u_b^2]^{1/2}$$

Il est recommandé d'utiliser un tableur conformément aux exemples ci-joints pour calculer l'incertitude recherchée pour chaque hauteur.

Il est rappelé que le barème réglementaire ne peut être donné que pour des incertitudes inférieures ou égales à celles tolérées par la réglementation. 1)

Si plusieurs points de mesurage sont utilisés pour le jaugeage, l'incertitude devrait, en théorie, être détaillée pour chaque couple V_0, h_0 et V_1, h_1 consécutifs, mais il est possible d'y renoncer si l'expérience montre que l'intérêt principal de la méthode consiste à déterminer la hauteur de départ du barème, l'exigence sur l'incertitude étant toujours satisfaite pour les hauteurs supérieures. Dans ce cas, il suffit de faire l'exercice pour le premier couple.

1) Un barème complémentaire différencié peut être établi.

RÉCAPITULATIF DES FORMULES POUR UNE CUVE A PAROIS VERTICALES JAUGÉE PAR EPALEMENT

INCERTITUDE RELATIVE ELARGIE SUR LE VOLUME V

$$U_v = 2 \left(\frac{u_v^2}{V^2} + u_b^2 \right)^{1/2}$$

Avec (voir le texte pour la signification des abréviations non explicitées)

u_b = incertitude-type sur l'établissement du barème.

$$u_v^2 = \frac{(V_0^2(h_1 - h)^2 + V_1^2(h - h_0)^2)u_m^2}{(h_1 - h_0)^2} + \left(\frac{(V_1 - V_0)(h - h_1)}{(h_1 - h_0)^2} \right)^2 u_{h_0}^2 + \left(\frac{(V_0 - V_1)(h - h_0)}{(h_1 - h_0)^2} \right)^2 u_{h_1}^2 + \left(\frac{V_1 - V_0}{h_1 - h_0} \right)^2 u_h^2$$

Dans laquelle :

u_m incertitude-type relative de l'ensemble de mesure

u_{h_0} incertitude-type sur le repérage d'un niveau inférieur lors du jaugeage

$$u_{h_0}^2 = u_L^2 + u_d^2 + u_i^2$$

u_{h_1} incertitude-type sur le repérage d'un niveau supérieur lors du jaugeage

$$u_{h_1}^2 = u_L^2 + u_R^2 + u_d^2 + u_i^2$$

u_h incertitude de linéarité pour un point quelconque du barème

$$u_h^2 = u_L^2 + u_f^2$$

Composantes élémentaires (sauf à le justifier) :

u_L incertitude-type de linéarité de la règle

$$u_L = \frac{emt}{2} \quad \text{Toutefois on peut prendre } u_L = \frac{u_{Lh_0} + u_{Lh_1}}{2}$$

u_R incertitude-type liée à la présence de n raccords de la règle

$$u_R = 0,5 \times \left(\frac{n}{3} \right)^{1/2}$$

u_d incertitude-type de repérage

$$u_d = \frac{2}{3} \text{ mm}$$

u_i incertitude-type liée à l'inclinaison

$$u_i = \frac{N}{3^{1/2}} \leq \frac{2}{3^{1/2}} \text{ mm}$$

La valeur de N est soit la valeur réellement calculée à partir des observations (inférieure à 1 mm) , soit 1 mm, soit 2 mm (voir texte)

u_f incertitude-type liée aux déformations

$$u_f = \frac{0,5}{3^{1/2}} \text{ mm} \quad \text{ou} \quad u_f = \frac{F}{3^{1/2}}$$

données dépendant de la cuve	données	calculées
surface nominale du liquide (m ²)	S = 3,142	
hauteur de départ (en m)	ho = 0,000	
volume de départ (en m ³)	Vo = 1,027	
hauteur de fin (en m)	h ₁ = 1,500	
volume de fin (en m ³)	V ₁ = 5,740	
nombre de raccordement entre ho et h ₁	n = 0	
incertitude type de l'ensemble de mesurage (k=2, en pour mille)	2	u _m = 0,001
incertitude type de linéarité pour ho (k=2, en mm)		u _{ho} = 0,150
incertitude type de linéarité pour h ₁ (k=2, en mm)		u _{h1} = 0,350
incertitude type de linéarité pour h (k=2, en mm)		u _h = 0,250
incertitude type sur le raccordement de la règle (en mm)		u _{h1} = 0,000
incertitude type sur le repérage des niveaux (k=3, en mm)	d = 2,0	u _d = 0,667
incertitude type due à l'inclinaison (k=3 ^{u.s} , en mm)	N = 1,0	u _i = 0,577
incertitude type due aux déformations de la cuve (k=3 ^{u.s} , en mm)	F = 0,5	u _f = 0,289
incertitude type sur l'établissement du barème (k=2, en pour mille)	lb = 0,3	u _b = 0,0002

$u_m^2 = 1,00E-06$
 $u_b^2 = 2,25E-08$

$u_{ho}^2 = 8,00E-07$
 $u_{h1}^2 = 9,00E-07$

$u_h^2 = 1,46E-07$

h (cm)	u ² v	U
1	1,03E-05	
2	1,02E-05	
3	1,01E-05	
4	9,95E-06	
5	9,85E-06	
6	9,76E-06	
7	9,67E-06	
8	9,58E-06	
9	9,50E-06	
10	9,43E-06	
11	9,35E-06	
12	9,29E-06	
13	9,22E-06	
14	9,17E-06	
15	9,11E-06	
16	9,06E-06	3,95E-03
17	9,02E-06	3,86E-03
18	8,98E-06	3,77E-03
19	8,94E-06	3,69E-03
20	8,91E-06	3,62E-03
21	8,88E-06	3,55E-03
22	8,86E-06	3,48E-03
23	8,84E-06	3,41E-03
24	8,83E-06	3,35E-03
25	8,82E-06	3,29E-03
26	8,82E-06	3,23E-03
27	8,82E-06	3,18E-03
28	8,82E-06	3,13E-03
29	8,83E-06	3,08E-03
30	8,84E-06	3,03E-03
31	8,86E-06	2,99E-03
32	8,89E-06	2,95E-03
33	8,91E-06	2,91E-03
34	8,94E-06	2,87E-03
35	8,98E-06	2,83E-03
36	9,02E-06	2,80E-03
37	9,07E-06	2,77E-03
38	9,12E-06	2,74E-03
39	9,17E-06	2,71E-03
40	9,23E-06	2,68E-03
41	9,29E-06	2,65E-03
42	9,36E-06	2,62E-03
43	9,43E-06	2,60E-03
44	9,51E-06	2,58E-03
45	9,59E-06	2,56E-03
46	9,68E-06	2,53E-03
47	9,77E-06	2,51E-03
48	9,86E-06	2,50E-03
49	9,96E-06	2,48E-03
50	1,01E-05	2,46E-03

h (cm)	u ² v	U
51	1,02E-05	2,44E-03
52	1,03E-05	2,43E-03
53	1,04E-05	2,42E-03
54	1,05E-05	2,40E-03
55	1,07E-05	2,39E-03
56	1,08E-05	2,38E-03
57	1,09E-05	2,36E-03
58	1,11E-05	2,35E-03
59	1,12E-05	2,34E-03
60	1,14E-05	2,33E-03
61	1,15E-05	2,32E-03
62	1,17E-05	2,32E-03
63	1,18E-05	2,31E-03
64	1,20E-05	2,30E-03
65	1,22E-05	2,29E-03
66	1,23E-05	2,29E-03
67	1,25E-05	2,28E-03
68	1,27E-05	2,27E-03
69	1,29E-05	2,27E-03
70	1,31E-05	2,26E-03
71	1,33E-05	2,26E-03
72	1,35E-05	2,25E-03
73	1,37E-05	2,25E-03
74	1,39E-05	2,25E-03
75	1,41E-05	2,24E-03
76	1,44E-05	2,24E-03
77	1,46E-05	2,24E-03
78	1,48E-05	2,23E-03
79	1,51E-05	2,23E-03
80	1,53E-05	2,23E-03
81	1,55E-05	2,23E-03
82	1,58E-05	2,23E-03
83	1,60E-05	2,22E-03
84	1,63E-05	2,22E-03
85	1,66E-05	2,22E-03
86	1,68E-05	2,22E-03
87	1,71E-05	2,22E-03
88	1,74E-05	2,22E-03
89	1,76E-05	2,22E-03
90	1,79E-05	2,22E-03
91	1,82E-05	2,22E-03
92	1,85E-05	2,22E-03
93	1,88E-05	2,22E-03
94	1,91E-05	2,22E-03
95	1,94E-05	2,22E-03
96	1,97E-05	2,22E-03
97	2,01E-05	2,22E-03
98	2,04E-05	2,22E-03
99	2,07E-05	2,22E-03
100	2,10E-05	2,22E-03

h (cm)	u ² v	U
101	2,14E-05	2,22E-03
102	2,17E-05	2,22E-03
103	2,20E-05	2,22E-03
104	2,24E-05	2,22E-03
105	2,27E-05	2,23E-03
106	2,31E-05	2,23E-03
107	2,35E-05	2,23E-03
108	2,38E-05	2,23E-03
109	2,42E-05	2,23E-03
110	2,46E-05	2,23E-03
111	2,50E-05	2,23E-03
112	2,53E-05	2,23E-03
113	2,57E-05	2,24E-03
114	2,61E-05	2,24E-03
115	2,65E-05	2,24E-03
116	2,69E-05	2,24E-03
117	2,73E-05	2,24E-03
118	2,77E-05	2,24E-03
119	2,82E-05	2,25E-03
120	2,86E-05	2,25E-03
121	2,90E-05	2,25E-03
122	2,94E-05	2,25E-03
123	2,99E-05	2,25E-03
124	3,03E-05	2,26E-03
125	3,07E-05	2,26E-03
126	3,12E-05	2,26E-03
127	3,16E-05	2,26E-03
128	3,21E-05	2,26E-03
129	3,26E-05	2,27E-03
130	3,30E-05	2,27E-03
131	3,35E-05	2,27E-03
132	3,40E-05	2,27E-03
133	3,44E-05	2,27E-03
134	3,49E-05	2,28E-03
135	3,54E-05	2,28E-03
136	3,59E-05	2,28E-03
137	3,64E-05	2,28E-03
138	3,69E-05	2,29E-03
139	3,74E-05	2,29E-03
140	3,79E-05	2,29E-03
141	3,84E-05	2,29E-03
142	3,90E-05	2,29E-03
143	3,95E-05	2,30E-03
144	4,00E-05	2,30E-03
145	4,05E-05	2,30E-03
146	4,11E-05	2,30E-03
147	4,16E-05	2,31E-03
148	4,22E-05	2,31E-03
149	4,27E-05	2,31E-03
150	4,33E-05	2,31E-03

données dépendant de la cuve	données	calculées
surface nominale du liquide (m ²)	S = 3,142	
hauteur de départ (en m)	ho = 0,000	
volume de départ (en m ³)	Vo = 1,027	
hauteur de fin (en m)	h ₁ = 1,500	
volume de fin (en m ³)	V ₁ = 5,740	
nombre de raccordement entre ho et h ₁	n = 0	
incertitude type de l'ensemble de mesurage (k=2, en pour mille)	2	u _m = 0,001
incertitude type de linéarité pour ho (k=2, en mm)		u _{ho} = 0,150
incertitude type de linéarité pour h ₁ (k=2, en mm)		u _{h1} = 0,350
incertitude type de linéarité pour h (k=2, en mm)		u _h = 0,250
incertitude type sur le raccordement de la règle (en mm)		u _{rh1} = 0,000
incertitude type sur le repérage des niveaux (k=3, en mm)	d = 2,0	u _d = 0,667
incertitude type due à l'inclinaison (k=3 ^{0,5} , en mm)	N = 2,0	u _i = 1,155
incertitude type due aux déformations de la cuve (k=3 ^{0,5} , en mm)	F = 0,5	u _f = 0,289
incertitude type sur l'établissement du barème (k=2, en pour mille)	lb = 0,3	u _b = 0,0002

u_m² = 1,00E-06
u_b² = 2,25E-08

u_{ho}² = 1,80E-06
u_{h1}² = 1,90E-06

u_h² = 1,46E-07

h (cm)	u ² v	U
1	2,00E-05	
2	1,98E-05	
3	1,95E-05	
4	1,93E-05	
5	1,91E-05	
6	1,89E-05	
7	1,87E-05	
8	1,85E-05	
9	1,83E-05	
10	1,81E-05	
11	1,79E-05	
12	1,77E-05	
13	1,75E-05	
14	1,74E-05	
15	1,72E-05	
16	1,71E-05	
17	1,69E-05	
18	1,68E-05	
19	1,66E-05	
20	1,65E-05	
21	1,64E-05	
22	1,63E-05	
23	1,62E-05	
24	1,60E-05	
25	1,60E-05	
26	1,59E-05	
27	1,58E-05	
28	1,57E-05	
29	1,56E-05	
30	1,56E-05	
31	1,55E-05	3,95E-03
32	1,54E-05	3,88E-03
33	1,54E-05	3,81E-03
34	1,54E-05	3,75E-03
35	1,53E-05	3,69E-03
36	1,53E-05	3,64E-03
37	1,53E-05	3,58E-03
38	1,53E-05	3,53E-03
39	1,52E-05	3,48E-03
40	1,52E-05	3,43E-03
41	1,52E-05	3,39E-03
42	1,53E-05	3,34E-03
43	1,53E-05	3,30E-03
44	1,53E-05	3,26E-03
45	1,53E-05	3,22E-03
46	1,54E-05	3,18E-03
47	1,54E-05	3,15E-03
48	1,54E-05	3,11E-03
49	1,55E-05	3,08E-03
50	1,56E-05	3,05E-03

h (cm)	u ² v	U
51	1,56E-05	3,02E-03
52	1,57E-05	2,99E-03
53	1,58E-05	2,97E-03
54	1,59E-05	2,94E-03
55	1,59E-05	2,91E-03
56	1,60E-05	2,89E-03
57	1,61E-05	2,87E-03
58	1,63E-05	2,85E-03
59	1,64E-05	2,82E-03
60	1,65E-05	2,80E-03
61	1,66E-05	2,79E-03
62	1,68E-05	2,77E-03
63	1,69E-05	2,75E-03
64	1,70E-05	2,73E-03
65	1,72E-05	2,72E-03
66	1,74E-05	2,70E-03
67	1,75E-05	2,69E-03
68	1,77E-05	2,68E-03
69	1,79E-05	2,66E-03
70	1,81E-05	2,65E-03
71	1,82E-05	2,64E-03
72	1,84E-05	2,63E-03
73	1,86E-05	2,62E-03
74	1,89E-05	2,61E-03
75	1,91E-05	2,60E-03
76	1,93E-05	2,59E-03
77	1,95E-05	2,58E-03
78	1,98E-05	2,57E-03
79	2,00E-05	2,57E-03
80	2,02E-05	2,56E-03
81	2,05E-05	2,55E-03
82	2,08E-05	2,55E-03
83	2,10E-05	2,54E-03
84	2,13E-05	2,54E-03
85	2,16E-05	2,53E-03
86	2,19E-05	2,53E-03
87	2,22E-05	2,52E-03
88	2,25E-05	2,52E-03
89	2,28E-05	2,51E-03
90	2,31E-05	2,51E-03
91	2,34E-05	2,51E-03
92	2,37E-05	2,50E-03
93	2,40E-05	2,50E-03
94	2,44E-05	2,50E-03
95	2,47E-05	2,50E-03
96	2,51E-05	2,49E-03
97	2,54E-05	2,49E-03
98	2,58E-05	2,49E-03
99	2,61E-05	2,49E-03
100	2,65E-05	2,49E-03

h (cm)	u ² v	U
101	2,69E-05	2,49E-03
102	2,73E-05	2,49E-03
103	2,77E-05	2,49E-03
104	2,81E-05	2,49E-03
105	2,85E-05	2,48E-03
106	2,89E-05	2,48E-03
107	2,93E-05	2,48E-03
108	2,97E-05	2,48E-03
109	3,02E-05	2,49E-03
110	3,06E-05	2,49E-03
111	3,10E-05	2,49E-03
112	3,15E-05	2,49E-03
113	3,19E-05	2,49E-03
114	3,24E-05	2,49E-03
115	3,29E-05	2,49E-03
116	3,33E-05	2,49E-03
117	3,38E-05	2,49E-03
118	3,43E-05	2,49E-03
119	3,48E-05	2,49E-03
120	3,53E-05	2,49E-03
121	3,58E-05	2,50E-03
122	3,63E-05	2,50E-03
123	3,68E-05	2,50E-03
124	3,73E-05	2,50E-03
125	3,79E-05	2,50E-03
126	3,84E-05	2,50E-03
127	3,89E-05	2,51E-03
128	3,95E-05	2,51E-03
129	4,01E-05	2,51E-03
130	4,06E-05	2,51E-03
131	4,12E-05	2,51E-03
132	4,18E-05	2,52E-03
133	4,23E-05	2,52E-03
134	4,29E-05	2,52E-03
135	4,35E-05	2,52E-03
136	4,41E-05	2,52E-03
137	4,47E-05	2,53E-03
138	4,53E-05	2,53E-03
139	4,59E-05	2,53E-03
140	4,66E-05	2,53E-03
141	4,72E-05	2,54E-03
142	4,78E-05	2,54E-03
143	4,85E-05	2,54E-03
144	4,91E-05	2,54E-03
145	4,98E-05	2,55E-03
146	5,04E-05	2,55E-03
147	5,11E-05	2,55E-03
148	5,18E-05	2,55E-03
149	5,25E-05	2,56E-03
150	5,31E-05	2,56E-03

ANNEXE A.3

**ELEMENTS POUR LA DETERMINATION DE L'INCERTITUDE
LIEE A L'UTILISATION D'UN ENSEMBLE DE MESURAGE
POUR LES JAUGEAGES**

Les documents ci-joints (extrait de la circulaire du 15 mars 1991 et exemple de la vérification d'un ensemble de mesurage routier) doivent être considérés et adaptés, en tant que de besoin. Les considérations ci-après s'appliquent en outre.

I - NOMBRE D'ESSAIS POUR LA DETERMINATION DE LA CORRECTION

- 1.1 La fidélité d'un instrument de mesure n'est jamais parfaite. Il est de règle de procéder à plusieurs essais pour déterminer l'erreur de justesse (systématique) d'un instrument de mesure, la dispersion des résultats fournissant une composante d'incertitude, selon la règle suivante :

Soit : - n mesurages effectués lors de l'étalonnage
 - m la moyenne des résultats
 - v la valeur vraie du mesurande (moyenne, le cas échéant)
 - s l'écart-type expérimental des n résultats

L'erreur systématique de l'instrument étalonné est estimée par :

$$e = m - v$$

La correction à apporter aux lectures (ajouter algébriquement aux lectures) est donc :

$$c = - e$$

L'incertitude-type sur la détermination de l'erreur systématique ou la correction est :

$$u_r = s/n^{1/2}$$

- 1.2 La qualification de l'ensemble de mesurage doit donc comprendre une étude de la répétabilité des résultats, qui conditionnera :
- le nombre d'essais à effectuer pour son étalonnage périodique,
 - la valeur de la composante d'incertitude associée.
- 1.3 Il est cependant envisageable, après étude conformément au point 1.2 et dans le cas d'une très bonne répétabilité de l'ensemble de mesurage, d'étalonner l'ensemble de mesurage sur un essai seulement.

L'incertitude correspondante devra être déterminée avec circonspection par une solution du type : deux fois (ou trois fois) la plus grande incertitude de répétabilité observée sur des séries de n mesurages dans le cadre de l'étude menée en 1.2.

II - REPRODUCTIBILITE DES RESULTATS

- 2.1 Si l'étalonnage d'un instrument de mesure résulte en général de plusieurs déterminations, lors de l'utilisation pratique de cet instrument, on ne fait en général qu'une détermination. C'est le cas lors des jaugeages.

La valeur vraie déterminée lors de l'étalonnage, avec une incertitude $s/n^{1/2}$ est alors optimiste.

Les résultats fournis par l'étalon sont entachés d'une incertitude liée notamment à :

- sa répétabilité,
- sa dérive.

Pour simplifier, on peut englober tout ceci dans une incertitude de reproductibilité de l'ensemble de mesurage.

- 2.2 La qualification de l'ensemble de mesurage devrait donc comprendre une étude sur la reproductibilité des résultats.

On pourra s'en affranchir en appliquant les dispositions ci-après :

La circulaire du 15 mars 1991, applicable au cas des camions/wagons-citernes et la circulaire du 18 décembre 1996, d'application plus générale, prévoient toutes deux l'utilisation d'un ensemble de mesurage pour les jaugeages. Elles précisent que l'ensemble de mesurage doit être réétalonné chaque fois qu'un écart supérieur à une valeur E a été observé lors des contrôles journaliers. Dans la première circulaire E est égale à 0,5 pour mille ; la seconde circulaire prévoit que, sauf pour les camions/wagons-citernes, E est égal à un pour mille.

On peut considérer que E constitue la limite supérieure de la dispersion. Le facteur de réduction à l'écart-type doit alors être pris égal à $3^{1/2}$ (distribution rectangulaire). L'incertitude-type sur la représentabilité du résultat par rapport à la valeur vraie conventionnelle est alors :

$$u_R = \frac{E}{3^{1/2}}$$

III - DEBITS D'UTILISATION DE L'ENSEMBLE DE MESURAGE

L'erreur d'un ensemble de mesurage est fonction de son débit.

Les circulaires ci-dessus mentionnées prévoient que l'on peut utiliser l'ensemble de mesurage à des débits hors de l'étendue des débits "admissibles", pour des volumes au plus égaux à 5 % de la capacité totale.

Par débits admissibles, il faut comprendre zone de débits pour laquelle la courbe d'erreurs peut être considérée plate.

Trois aspects sont à considérer :

- 1) les diminutions du débit pour explorer une zone par exemple,
- 2) les cas où l'on s'accorde une tolérance par rapport au plateau de la courbe d'erreur,
- 3) les arrêts et démarrages.

3.1 Diminution du débit.

- a) Les cas d'utilisations hors de l'étendue des débits admissibles, pour cause de diminution du débit, pourront être considérés par analogie avec la composante 9 "incertitude liée au fait que le débit d'essais n'est pas celui recherché" de l'exemple ci-joint sur la vérification d'un ensemble de mesurage routier.

Le cas pourra être considéré une fois pour toutes, l'incertitude correspondante entrant pratiquement dans la détermination de l'incertitude de l'ensemble de mesurage (en fait il se rapporterait à la méthode de jaugeage), ou pourra être considéré au cas par cas, l'incertitude correspondante entrant dans la détermination des incertitudes de chaque jaugeage.

Une étude au cas par cas, plus contraignante, présenterait les avantages suivants :

- permettre de considérer les incertitudes propres à chaque jaugeage, et non globalement sur l'ensemble des jaugeages,
- permettre d'appliquer des corrections afin de minimaliser les incertitudes résiduelles (après correction) pour chaque jaugeage individuel.

Le COFRAC et la sous-direction de la métrologie estime qu'en l'état des choses l'aspect "globalisé" est suffisant pour l'instant.

Dans une approche individualisée, la formule donnant l'incertitude dite I au point 9 du c) de l'annexe 5, servirait de base pour une correction en tenant compte :

- du signe approprié,
- du débit approprié et non plus du débit le plus défavorable,
- de la proportion effective du volume débité à ce débit approprié.

Les incertitudes seraient à considérer par rapport à ces nouvelles hypothèses, selon une formule à établir.

Exemple de cas considéré globalement, une fois pour toutes : application d'une exigence consistant à débiter au plus 5 % de **chaque** volume intermédiaire (et non seulement par rapport au volume total) hors des débits admissibles.

Par rapport à l'exemple en question, $k' = 0,05$; soit E l'erreur aux débits admissibles et e l'erreur présentant le plus grand écart par rapport à E, pour l'ensemble des débits réellement utilisables. Dans la formule de l'exemple ci-joint, E correspond à E_{GD} et e à E_{PD} .

Soit par exemple :

$$|E - e| = 4 \times 10^{-3}$$

L'incertitude-type correspondante est, selon la formule en question :

$$\begin{aligned} u_d &= 0,05 \times 4 \times 10^{-3} / 3^{1/2} \\ &= 1,15 \times 10^{-4} \end{aligned}$$

La procédure de jaugeage doit comprendre les modalités d'invalidation des mesurages si les hypothèses de départ ne sont pas respectées.

- b) On peut également envisager d'évaluer l'influence d'une diminution du débit selon le type A. Sujet non traité.

3.2 Tolérance par rapport au plateau de la courbe d'erreur

On peut traiter le sujet selon 3.1 a) ci-dessus, en adaptant les proportions et l'écart admis.

3.3 Démarrages et arrêts

Un démarrage et un arrêt sont inclus dans toute procédure d'étalonnage d'un ensemble de mesurage. En toute rigueur, la correction donnée par la courbe d'erreur n'est valable que si les volumes sont débités, lors du jaugeage, dans les mêmes conditions que lors de l'étalonnage (même volume, même débit évidemment, même nombre d'arrêts, mêmes conditions de ralentissement du débit). Cependant, en pratique, une étude sur le sujet ne devrait être utile que lorsque la procédure de jaugeage nécessite des arrêts fréquents, correspondant à des volumes faibles par rapport au volume de la jauge ayant permis l'étalonnage de l'ensemble de mesurage.

Le sujet n'est donc pas traité bien qu'il serait intéressant de considérer cet aspect pour les camions et wagons-citernes. Une détermination d'incertitude selon le type A semblerait le seul moyen adapté. Des corrections devraient ou pourraient être apportées.

ANNEXE A.4

EXTRAIT DE LA CIRCULAIRE DU 15 MARS 1991

Notes : Voir commentaire en III de la note générale introductive
Le texte ci-joint a été reproduit après scannérisation. En cas de doute, consulter le texte original.

1.5. CORRECTIONS ET INCERTITUDES**1.5.1. Généralités**

La valeur d'un étalon est toujours connue avec une incertitude, en plus ou en moins.

Par ailleurs, la valeur d'un étalon peut être quantifiée au moyen d'une valeur nominale accompagnée d'une erreur (ou d'une correction) qui est connue.

En conséquence, la valeur étalon se présente souvent sous la forme :

$$V = V_0 + c \pm i = V_0 - e \pm i$$

avec :

- . V : valeur (conventionnellement) vraie de l'étalon,
- . V₀ : valeur nominale de l'étalon,
- . c : correction (connue),
- . e : erreur (connue),
- . i : incertitude (en général symétrique par rapport à la valeur vraie).

Parfois, la valeur de l'erreur est nulle car l'étalon a été ajusté à la valeur nominale lors de l'étalonnage. C'est souvent le cas pour les jauges.

Enfin, lors d'un étalonnage, l'erreur est donnée par la différence algébrique de la valeur lue (V lue) et de la valeur étalon (V vraie) :

$$e = V \text{ lue} - V \text{ vraie}$$

La correction (c) est égale à l'opposée de l'erreur : $c = -e$

De plus, la mise en oeuvre des étalons utilisés pour étalonner ou vérifier d'autres instruments s'accompagne également d'écarts appréciables (dus à l'influence de la température par exemple) dont on peut tenir compte ou non, selon leur importance, et d'incertitudes, par exemple incertitude due à la méconnaissance de la température exacte ou incertitudes liées aux variations aléatoires.

1.5.2. Corrections

1.5.2.1. Correction due à l'erreur relevée lors de l'étalonnage

Les volumes jaugés doivent être corrigés des erreurs des jauges étalons ou des ensembles de mesurage étalons.

Dans le cas de jauges, c'est donc le volume effectif qui doit être pris en considération, c'est-à-dire le volume vrai relevé sur le certificat d'étalonnage. Souvent l'erreur est nulle (voir 1.5.1).

Dans le cas d'ensembles de mesurage, suivant que les documents d'étalonnage (courbe, tableau) donnent l'erreur ou la correction de l'ensemble :

- l'erreur est soustraite algébriquement de la valeur lue sur l'ensemble de mesurage,
- la correction est ajoutée algébriquement à la valeur lue.

Si les erreurs sont négligeables, il est autorisé de ne pas appliquer de correction, mais il doit en être tenu compte pour le calcul final des incertitudes.

1.5.2.2. Correction due à l'influence de la température

Il peut être nécessaire de tenir compte de la correction en fonction de la température.

1.5.2.2.1. Jaugeages effectués au moyen de jauges

La formule suivante est applicable dans le cas de jauges :

$$V_c = V_e [1 + A (t_e - t_r) + B (t_r - t_c)] \frac{v_{mc}}{v_{me}}$$

Dans laquelle :

V_c est le volume du récipient mesure à la température de référence,

V_e est le volume mesuré à l'aide de l'installation étalon et auquel on a appliqué la correction sur l'étalon,

A est le coefficient de dilatation cubique du matériau de construction des jauges étalons ($^{\circ}\text{C}^{-1}$),

B est le coefficient de dilatation cubique du matériau de construction du récipient-mesure à jauger ($^{\circ}\text{C}^{-1}$),

t_r est la température de référence ($^{\circ}\text{C}$), réglementairement égale à 20°C ,

t_e est la température moyenne du liquide dans l'installation étalon ($^{\circ}\text{C}$),

t_c est la température moyenne du liquide dans le récipient-mesure à jauger ($^{\circ}\text{C}$),

v_{mc} , v_{me} sont les volumes massiques du liquide à t_c et t_e .

Le volume délivré par l'installation étalon doit être corrigé en fonction de l'erreur fournie par le certificat d'étalonnage, mais aussi en fonction de la température à laquelle cet étalonnage a été effectué lorsqu'elle est différente de t_r .

On applique alors la formule

$$V_e = V_{e0} [1 + A (t_r - t_0)]$$

dans laquelle :

V_{e0} : est le volume mesuré à l'aide de l'installation étalon et auquel on n'a appliqué que la correction donnée par le certificat d'étalonnage,

t_0 : est la température figurant sur le procès-verbal d'étalonnage, à laquelle celui-ci a été effectué,

V_e , A , t_r : ont le même sens que ci-dessus.

Remarquons que le volume V_c à la température de référence peut être directement donné par la formule :

$$V_c = V_{e0} [+ A (t_e - t_0) + B (t_r - t_c)] \frac{v_{mc}}{v_{me}}$$

Dans le cas général où le jaugeage est effectué avec de l'eau, les considérations suivantes s'appliquent :

- 1) Il est souhaitable que, pendant le jaugeage, la température de l'eau ne varie pas de plus de 2°C . La température de l'eau est mesurée, dans l'installation étalon et dans le récipient-mesure à jauger.
- 2) Lorsque cette condition est remplie et que la température de l'eau est dans l'intervalle $t_r \pm 10^{\circ}\text{C}$, il n'est pas nécessaire d'appliquer de correction en fonction de la température.
- 3) Les températures devraient être mesurées à $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ près

Une annexe jointe* donne des valeurs du volume massique de l'eau qui peuvent être retenues, et des exemples de valeurs de coefficients de dilatation cubique.

* Voir circulaire complète

A titre d'exemple, dans le cas d'une jauge en acier inoxydable, étalonnée à 20 °C, d'un volume mesuré à 15 °C dans la jauge étalon et d'une eau à 20 °C en fin d'opération dans un récipient-mesure du même matériau, l'influence de la température est de l'ordre de 7.10^{-4} .

Lorsque la correction n'est pas effectuée, il doit en être tenu compte pour le calcul des incertitudes.

1.5.2.2.2. Jaugeages effectués au moyen d'un ensemble de mesurage

A) Etalonnage de l'ensemble de mesurage

L'ensemble de mesurage est étalonné au moyen d'une jauge ayant elle-même été préalablement étalonnée à la température t_0 , et dont le volume porté sur le certificat d'étalonnage est V_{e0} .

Lors de l'étalonnage, la température moyenne du liquide dans l'ensemble de mesurage est t_a . Le liquide se trouve à la température moyenne t_j dans la jauge en fin d'étalonnage.

Le volume lu sur l'ensemble de mesurage est V_{la} .

L'erreur (absolue) de l'ensemble de mesurage est donnée par la formule :

$$e = V_{la} - V_{e0} [1 + A (t_j - t_0)] \frac{v_{ma}}{v_{mj}}$$

Dans laquelle :

v_{ma} et v_{mj} sont respectivement les volumes massiques du fluide aux températures t_a et t_j ,

A a le même sens que ci-dessus.

On en déduit l'erreur relative du compteur e_r ou le coefficient de correction :

$$k = \frac{V_{va}}{V_{la}}$$

V_{va} est le volume vrai ayant traversé l'ensemble de mesure.

$$V_{va} = V_{eo} [1 + A(t_j - t_o)] \frac{v_{ma}}{v_{mj}}$$

B) Jaugeage

Lors du jaugeage, la température moyenne dans l'ensemble de mesure étalon est t_e et, en fin de jaugeage, la température moyenne dans le récipient-mesure à jauger est t_c .

La température doit être suffisamment proche de la température t_a lors de l'étalonnage.

Le volume lu sur l'ensemble de mesure étant V_{le} , le volume vrai délivré V_{ve} est alors :

$$V_{ve} = \frac{V_{le}}{1 + e_r} = k V_{le}$$

Le volume V_c du récipient-mesure à jauger, à la température de référence t_r , est donné par la formule :

$$V_c = k V_{le} [1 + B(t_r - t_c)] \frac{v_{mc}}{v_{me}}$$

Dans laquelle :

v_{mc} et v_{me} sont respectivement les volumes massiques du liquide aux températures t_c et t_e ,

B a le même sens que ci-dessus.

Remarquons que le volume V_c à la température de référence peut être donné globalement par la formule :

$$V_c = V_{eo} [1 + A(t_j - t_o) + B(t_r - t_c)] \frac{v_{mc} \times v_{ma} \times V_{le}}{v_{me} \times v_{mj} \times V_{la}}$$

Les considérations générales données à la fin du paragraphe 1.5.2.2.1 s'appliquent avec les adaptations nécessaires, et, peut-être, en réduisant les fourchettes de température.

1.5.3. Incertitudes

Les incertitudes doivent être calculées selon les méthodes en vigueur au Bureau national de métrologie (BNM)*. Quelques aspects pratiques sont abordés ci-après. Pour la théorie on se reportera aux normes citées en bibliographie.

* aujourd'hui, comprendre COFRAC

Les incertitudes dont les causes sont indépendantes sont sommées quadratiquement. Dans la suite du texte on suppose un coefficient k égal à trois, correspondant à un niveau de confiance de 99,8 %, au sens du paragraphe 8.2 de la norme NF X 06-044 (voir bibliographie). L'incertitude est donc introduite au niveau des formules statistiques à la place de l'écart-type

Sauf raison particulière on prendra ce coefficient pour le calcul des incertitudes**.

** voir note introductive

Parmi les causes d'incertitudes, on peut citer :

- incertitudes liées aux étalons de volume,
- incertitudes liées aux étalons de longueur,
- incertitudes liées aux erreurs de lecture,
- incertitudes liées aux influences de la température,
- incertitudes liées aux déformations,
- incertitudes liées à la position d'utilisation,
- incertitudes liées au mouillage, au temps d'égouttage, à la nature du liquide,
- incertitudes liées aux autres conditions de mise en oeuvre.

1.5.3.1. Incertitudes liées aux étalons de volume.

1.5.3.1.1. jaugeages effectués au moyen de jauges

Dans le cas de jauges, on appliquera la méthode en vigueur au BNM.

Soit une jauge étalon dont l'incertitude est donnée sous la forme :

$$I = \pm (A + BV)$$

avec :

A et B constantes

V volume de la jauge.

L'incertitude sur un volume délivré correspondant à n fois le volume de la jauge est donnée par :

$$I_n = \pm (A + BV) n^{1/2}$$

Il s'agit de l'incertitude absolue. En valeur relative cela donne :

$$I_{rn} = \pm \frac{A + BV}{V \cdot n^{1/2}}$$

L'incertitude sur la jauge étalon constitue donc un majorant lorsque l'on raisonne en valeur relative.

Lorsque l'on dispose d'un jeu de trois jauges respectivement de volume V_1 , V_2 , v et utilisées n_1 , n_2 et n_3 fois, l'incertitude absolue est donnée par :

$$I^2 = \pm [n_1 (A_1+B_1V_1)^2 + n_2 (A_2+B_2V_2)^2 + n_3 (A_3+B_3v)^2]$$

On n' a pas tenu compte du fait que la jauge de volume v n'est pas nécessairement complètement vidée à la dernière utilisation.

Enfin, pour tenir compte de l'état de la jauge, on pourra appliquer un coefficient de sécurité, 2 par exemple.

1.5.3.1.2 Jaugeages effectués au moyen d'un ensemble de mesurage

Dans le cas d'un ensemble de mesurage, il convient notamment de prendre en considération :

- l'incertitude portée sur le certificat d'étalonnage de la jauge étalon,
- l'état de la jauge étalon,
- les conditions dans lesquelles l'étalonnage de l'ensemble de mesurage est effectué,
- l'écart entre la température d'étalonnage et la température de jaugeage (par calcul ou au moyen de l'expérimentation),
- les divers débits effectifs d'utilisation,
- la fidélité de l'ensemble de mesurage (l'incertitude de lecture peut être considérée traitée au niveau de la fidélité.

La formule donnée en fin du paragraphe 1.5.2.2.2 montre bien que la fidélité de l'ensemble de mesurage intervient deux fois : lors de l'étalonnage et lors de l'utilisation. En effet, à chacune de ces opérations, pour les volumes effectivement délivrés, les résultats lus auraient pu être différents, dans les limites de la fidélité de l'instrument.

1.5.3.2. Incertitudes liées aux mesures de longueur.

Elles sont principalement dues à l'erreur sur la mesure de longueur et à l'erreur de lecture. Si nécessaire, on peut prendre en considération l'influence de la température notamment.

En général, l'incertitude sur le repérage des niveaux (I_2) pourra être donnée par :

$$I_2^2 = \pm (I_1^2 + I_2^2)$$

avec

I_1 erreur maximale tolérée pour la mesure de longueur en fonction de la classe de précision,

I_2 erreur maximale de lecture estimée.

Cette incertitude aura une influence maximale dans la zone de barémage correspondant à la limite inférieure de sensibilité.

L'incertitude relative maximale sur le volume (I_{r1}), en pour mille, engendrée par l'incertitude sur le repérage du niveau est donnée par :

$$I_{r1} = \frac{II}{s}$$

avec : s égal à 2 mm pour les citernes* ou 1,5 mm pour les wagons.

* depuis, l'exigence a été ramenée à 1,5 mm pour les camions-citernes

1.5.3.3. Incertitudes liées aux erreurs de lecture

Les incertitudes de lecture liées aux mesures de longueur et aux ensembles de mesurage sont considérées dans les paragraphes précédents.

Dans le cas de jauges, l'incertitude de lecture doit, sauf raisons particulières, être considérée comme égale à la moitié de l'échelon le plus grand de la jauge fractionnée. Il convient de tenir compte du volume compris entre la dernière graduation et le robinet ou la vanne de la jauge.

1.5.3.4. Incertitudes liées aux influences de la température

1.5.3.4.1. Jaugeages effectués au moyen de jauges.

L'incertitude relative (I_{rt}) sur le volume jaugé est donnée par (en négligeant les termes du second ordre) :

$$I_{rt}^2 = \left[A - \frac{dv_{me}}{dte} \right]^2 I_{te}^2 + \left[-B + \frac{dv_{mc}}{dte} \right]^2 I_{tc}^2$$

avec :

$\frac{dv_{me}}{dte}$ variation de la valeur numérique du volume massique du liquide par degré Celsius autour de la température t_e ,

$\frac{dv_{mc}}{dte}$ variation de la valeur numérique du volume massique du liquide par degré Celsius autour de la température t_c ,

I_{te} , I_{tc} incertitudes sur les mesures de t_e et t_c .

Cette formule peut être utilisée pour calculer l'incertitude liée à la mesure des températures ou pour calculer l'erreur moyenne due au fait que l'on applique une correction moyenne alors que les températures t_e et t_c se situent, en fait, dans une fourchette.

Exemple :

Dans le cas de jauges et de récipients-mesures en acier inoxydable, l'installation de jaugeage à l'eau est telle que par expérience, la température dans les jauges est en moyenne égale à 15 °C et dans l'intervalle 13 °C à 17 °C, et que la température dans les récipients-mesures est en moyenne égale à 18 °C et dans l'intervalle 16 °C à 20 °C.

On suppose les répartitions gaussiennes et on assimile la variation du volume massique en fonction de la température à une variation linéaire.

On se propose d'appliquer la correction moyenne correspondant à $t_c = 15$ °C et à $t_c = 18$ °C, quelles que soient exactement ces températures.

La correction moyenne relative est $C = 3,5 \times 10^{-4}$

On a par ailleurs (voir table pour l'eau en annexe) :

$\frac{dv_{me}}{dt_e}$ de l'ordre de $15 \times 10^{-5} \text{ °C}^{-1}$

$\frac{dv_{mc}}{dt_c}$ de l'ordre de $18 \times 10^{-5} \text{ °C}^{-1}$

D'où, si on néglige les incertitudes que l'on ferait sur les mesures des températures :

$$I_{rt}^2 = [(5,1 - 15)^2 \times 2^2 + (-5,1 + 18)^2 \times 2^2] \times 10^{-10}$$

$$\text{Soit } I_{rt} = 3,3 \times 10^{-4}$$

1.5.3.4.2 Jaugeages effectués au moyen d'un ensemble de mesurage

L'incertitude relative (I_{rt}) sur le volume délivré par l'ensemble de mesurage est donnée par (en négligeant les termes du second ordre) :

$$I_{rt}^2 = [A - \frac{dv_{mj}}{dt_j}]^2 I_{tj}^2 + [-B + \frac{dv_{mc}}{dt_c}]^2 I_{tc}^2 + [\frac{dv_{me}}{dt_e}]^2 I_{te}^2 + [\frac{dv_{ma}}{dt_a}]^2 I_{ta}^2$$

avec :

$\frac{dv_{mi}}{dt_i}$ variation de la valeur numérique du volume massique du liquide par degré Celsius autour de la température t_i ,

Δt_i incertitude sur la mesure de t_i .

1.5.3.5. Autres incertitudes

Les autres incertitudes doivent être estimées à partir de l'expérimentation.

Pour les déformations, en l'absence de précisions, on pourra prendre la moitié de l'amplitude maximale tolérée pour les déformations.

L'influence de la position d'utilisation pourra être négligée si la verticale de pige est bien centrée sur les centres de gravité des sections horizontales. Un calcul théorique est possible.

Pour le mouillage et le temps d'égouttage, sauf raison particulière, le jaugeage devrait être effectué parois mouillées au départ, après un égouttage de 30 s. Seule l'expérimentation peut permettre d'apprécier l'influence du non respect de cette procédure, en fonction du liquide, des divers matériaux et des diverses formes. L'utilisation d'additifs pour augmenter le pouvoir mouillant du liquide peut être envisagée.

Enfin, il conviendrait de tenir compte de l'exploitation des résultats de mesurage pour obtenir le barème. On pourra considérer que la mise en oeuvre du logiciel utilisé par l'administration se traduit par une incertitude inférieure à 5×10^{-4} .

Note : l'incertitude est très inférieure à cette valeur lorsque les relevés de niveaux ont été opérés correctement. La valeur donnée correspond à des cas d'erreurs de manipulations.

1.5.3.6. Incertitude globale

Les incertitudes sont sommées quadratiquement.

Exemple :

Incertitude relative liée aux étalons de volume	:	$\pm 10^{-3}$
Incertitude relative liée au repérage de niveaux	:	$\pm 0,5 \times 10^{-3}$
Incertitude relative liée à la lecture des jauges	:	$\pm 0,5 \times 10^{-3}$
Incertitude relative liée aux températures	:	$\pm 0,33 \times 10^{-3}$
Incertitude relative liée aux déformations	:	$\pm 0,5 \times 10^{-3}$
Incertitude liée à l'exploitation des résultats de mesurage	:	$\pm 0,5 \times 10^{-3}$
Incertitude estimée correspondant aux autres causes	:	$\pm 0,5 \times 10^{-3}$

L'incertitude relative globale estimée est donnée par :

$$I^2 = 10^{-6} [1 + 0,5^2 + 0,5^2 + 0,33^2 + 0,5^2 + 0,5^2 + 0,5^2] = 2,36 \times 10^{-6}$$

$$\text{Soit } I = \pm 1,54 \times 10^{-3}$$

Lorsque l'on ne corrige pas les résultats en fonction des erreurs liées aux étalons, il doit en être tenu compte pour la détermination des incertitudes. Il convient alors de faire la somme algébrique de toutes les erreurs quantifiables (erreurs sur les étalons, absence de correction en fonction de la température...). Les incertitudes en plus et en moins sont alors données par la somme algébrique des incertitudes calculées comme précédemment et de la somme des erreurs en question.

Dans le cas exposé au paragraphe 1.5.3.4 si l'on n'effectue pas la correction en fonction de la température, l'incertitude relative globale est telle que :

$$- 1,19 \times 10^{-3} < I < + 1,89 \times 10^{-3}$$

On approche alors la limite réglementaire tolérée : 2×10^{-3} en valeur relative.

ANNEXE A.5

EXEMPLE DE CALCUL D'INCERTITUDE

**Vérification d'un ensemble de mesurage routier
à l'aide d'une jauge étalon mobile**

a) Objet :

On se propose d'étudier l'adéquation de l'emploi d'une jauge étalon de 5 l en acier inoxydable pour la vérification périodique d'un ensemble de mesurage routier dont la livraison minimale est égale à 5 l, et dont l'échelon est égal à 1 cl ou 5 cl pour les ensembles de mesurage routiers à indication numérique et 1 cl ou 2 cl pour les ensembles de mesurage routiers à indication analogique.

L'étude porte sur l'essai sur la livraison minimale, bien entendu, mais aussi sur l'utilisation éventuelle de cette jauge pour l'essai à petit débit.

b) Liste des composantes d'incertitudes :

1. Incertitude donnée sur le certificat d'étalonnage de la jauge étalon,
2. Incertitude liée à la lecture de la jauge étalon,
3. Incertitude liée à la lecture sur l'ensemble de mesurage routier,
4. Incertitude liée à l'écart périodique du mesureur,
5. Incertitude liée à l'évaporation du produit d'essais durant l'étalonnage,
6. Incertitude liée au mouillage de la jauge,
7. Incertitude liée à l'influence de la différence entre la température du liquide dans la jauge étalon et la température de référence du certificat d'étalonnage de la jauge,
8. Incertitude liée à l'influence de la différence entre la température du liquide dans la jauge étalon et celle du liquide passé dans le mesureur,
9. Incertitude liée au fait que le débit d'essais n'est pas celui recherché,
10. Incertitude liée au jeu mécanique,
11. Incertitude liée à la prise en compte des impulsions émises par le compteur dans le cas d'un dispositif indicateur numérique,
12. Incertitude liée au fait que l'ensemble de mesurage n'est pas en condition "normale" de fonctionnement.

c) Etude des composantes d'incertitudes :

1. *Incertainitude donnée sur le certificat d'étalonnage de la jauge étalon :*

L'incertitude portée par le certificat d'étalonnage pour un facteur d'élargissement de deux, est égal à 2×10^{-4} .

2. *Incertainitude liée à la lecture de la jauge étalon :*

Cette incertitude est évaluée égale au 1/3 ou au 1/2 échelon (10^{-3}) de graduation de la jauge, suivant le type et la sensibilité de la jauge. Dans notre exemple, nous disposons d'une jauge à "col étroit" et nous retenons 1/3 d'échelon. Le facteur d'élargissement est pris égal à 3.

3. Incertitude liée à la lecture sur l'ensemble de mesurage routier :

La jauge est destinée à vérifier aussi bien des ensembles de mesurage routiers à indication analogique qu'à indication numérique.

Dans le cas d'un dispositif indicateur analogique, on considère que la résolution R est égale à un demi-échelon (e). On a une incertitude sur la remise à zéro et sur la lecture finale ; d'où :

$$u = \frac{R \times 2^{0,5}}{3} = \frac{e \times 2^{0,5}}{6}$$

Dans le cas d'un dispositif indicateur numérique, l'application du point 3.4.2* donnerait :

$$u = \frac{e}{6^{0,5}}$$

Cependant, l'expérience montre qu'en prenant des précautions (ralentir le débit) pour arrêter le débit dès le passage d'un échelon à l'autre, on peut diminuer cette valeur dans un rapport 1/3, ce qui revient à une résolution fictive d'un tiers d'échelon d'où :

$$u = \frac{e}{3 \times 6^{0,5}}$$

Dans le cas d'un essai à petit débit, on considère que cette condition est systématiquement satisfaite. Par contre, pour l'essai sur la livraison minimale, la procédure doit prévoir cette précaution, en tant que de besoin.

4. Incertitude liée à l'écart périodique du mesureur :

Deux cas peuvent se présenter ; celui où le volume cyclique est un sous multiple du volume d'essai, celui où le volume cyclique n'est pas un sous multiple du volume d'essais.

Dans le premier cas, l'incertitude liée à la distorsion cyclique est considérée comme négligeable.

Dans le second cas, il convient de considérer le cas de l'ensemble de mesurage routier en service le plus défavorable. Nous allons prendre ce cas pour l'étude ci-après.

L'écart périodique (e_c) d'un compteur à quatre pistons rotatifs est donné par la formule (voir signification des paramètres quelques lignes plus loin) :

$$e_c = a \times (1 + \sin \alpha - \cos \alpha - 4\alpha/\pi) \text{ à modulo } \pi/2$$

Il en résulte, en tenant compte des points de départ et d'arrivée, que l'écart périodique résultant e_{cr} est donné par :

*dans le document dont est issue la présente annexe.

$$e_{cr} = a \times (1 + \sin \beta - \cos \beta - 4 \beta/\pi) - a \times (1 + \sin \alpha - \cos \alpha - 4\alpha/\pi)$$

avec :

a coefficient représentant l'écart périodique maximal,

α angle représentatif de la position de l'axe du mesureur au moment du départ,

β angle représentatif de la position de l'axe du mesureur au moment de l'arrivée.

Le cas le plus défavorable du parc à vérifier est rencontré pour $a = 0,4$ cl.

Pour déterminer la variance de l'écart périodique, on décide de procéder à une exploitation informatique. On divise le cycle de départ en un nombre discret de points, avec un pas suffisamment fin (vingt) et on procède de même pour le cycle d'arrivée.

On pourrait considérer que le point de départ et le point d'arrivée sont liés par le volume cyclique et le volume de la jauge, mais comme les compteurs sont équipés d'un dispositif d'ajustage, on décide que chaque combinaison est possible.

L'exploitation informatique montre que l'incertitude-type est très proche de a (avec une décomposition en 20 points), ce qui laisse supposer qu'il serait peut-être possible de démontrer mathématiquement l'égalité parfaite.

5. *Incertaince liée à l'évaporation du produit d'essais durant l'étalonnage :*

L'expérience a permis d'évaluer l'amplitude de cette composante d'incertitude à 4×10^{-4} . Le facteur d'élargissement est pris égal à 3.

Il s'agit là de la dispersion par rapport à une évaporation type, et non de l'évaporation absolue dont la prise en considération serait peut-être de nature à remettre en cause les erreurs maximales tolérées sur les ensembles de mesurage.

En attendant une éventuelle remise en cause, on peut considérer que l'évaporation moyenne se produit aussi bien lors des ajustages par les fabricants ou réparateurs que lors des vérifications. Ceci justifie l'approche de la prise en considération de la dispersion de l'évaporation.

6. *Incertaince liée au mouillage de la jauge :*

L'expérience a permis d'évaluer l'amplitude de l'incertitude sur la dispersion du mouillage à 1×10^{-4} . Le facteur d'élargissement est pris égal à 3.

7. *Incertaince liée à l'influence de la différence de température entre le liquide de la jauge étalon et la température de référence du certificat d'étalonnage de la jauge :*

D'après les études réalisées, l'écart maximal trouvé entre la température du liquide dans la jauge et la température de référence indiquée sur son certificat d'étalonnage est de 10 °C (le coefficient cubique de dilatation thermique étant quant à lui pris pour l'acier inoxydable égal à $5.10^{-5}/$ °C). Le facteur d'élargissement est pris égal à 3.

8. *Incertitude liée à l'influence de la différence de température entre le liquide de la jauge étalon et celle du liquide passé dans le mesureur :*

D'après les études réalisées, l'écart maximal trouvé entre les deux températures, et après plusieurs opérations de mouillage, est au maximum de 1 °C. Le facteur d'élargissement est pris égal à 3.

9. *Incertitude liée au fait que le débit d'essais n'est pas celui recherché :*

Cette composante d'incertitude apparaît particulièrement pour les essais à grands débits, au cours desquels, à la fin, on est souvent amené à arrêter ou ralentir le débit pour éviter des débordements liés à la formation de mousse ou pour prendre les précautions de lecture ci-dessus évoquées.

Pour l'essai à petit débit, on considère que cette composante est nulle. On décide également de ne pas la considérer pour l'essai sur la livraison minimale, qui se fait dans des conditions quelconques.

Cette composante est abordée ci-après, à titre d'exemple, pour application à l'essai au débit maximal.

Pour l'essai au débit maximal, on considère que le volume débité au débit maximal correspond à 90 % du volume total et que le reste est débité au débit minimal :

L'erreur du mesureur dans les conditions d'essais (E) est donnée par la formule :

$$E = k \times E_{GD} + k' \times E_{PD}$$

avec :

E_{GD} erreur du mesureur au débit maximal,

E_{PD} erreur du mesureur au débit minimal,

k et k' coefficients proportionnels aux volumes débités aux débits d'essais respectifs ($k+k'=1$).

Soit l'incertitude $I = |E - E_{GD}|$

$$I = |k \times E_{GD} + k' \times E_{PD} - E_{GD}|$$

$$I = |(k - 1) \times E_{GD} + k' \times E_{PD}| \quad \text{or} \quad k = 1 - k'$$

$$I = k' \times |E_{PD} - E_{GD}|$$

Pour calculer l'incertitude-type, on considère qu'en moyenne l'erreur à grand débit est nulle et on se place dans la condition limite permettant l'acceptation de l'instrument, c'est-à-dire dans le cas d'une erreur égale à $\pm 0,5\%$, à petit débit. Soit $I = 0,1 \times 5 \cdot 10^{-3} = 5 \times 10^{-4}$.

Ne connaissant rien sur la distribution, on estime que la distribution suit une loi rectangulaire.

D'où une incertitude-type relative de $5 \times 10^{-4} / 3^{0,5}$, sous réserve de respecter le critère ci-dessus énoncé. Si l'on ne peut respecter les 90 % du volume débité au volume maximal, l'essai ne devrait pas être validé.

10. *Incertitude liée aux jeux mécaniques :*

On considère que les jeux mécaniques, d'une façon générale, sont déjà pris en considération dans certains points ci-dessus et que de plus en vérification périodique cela n'est pas fondamental.

11. *Incertitude liée à la prise en compte des impulsions émises par le compteur dans le cas d'un dispositif indicateur numérique :*

En règle générale, il y a correspondance entre la valeur d'une impulsion émise et celle d'un échelon indiqué par le dispositif indicateur. Dans ce cas particulier, nous considérerons l'incertitude liée à la différence comme nulle.

12. *Incertitude liée au fait que l'ensemble de mesurage n'est pas en condition "normale" de fonctionnement :*

Cette composante peut être due au fait que l'instrument est resté un long moment inutilisé avant les essais.

On considère qu'il n'y a pas lieu d'en tenir compte si l'on effectue, préalablement à tout essai métrologique, un essai à blanc.

d) Conclusion :

Les tableaux ci-joints montrent que l'incertitude maximale tolérée est satisfaite pour l'essai sur la livraison minimale : elle est inférieure au 1/3 de la valeur absolue de l'erreur maximale tolérée (1 %).

Cependant, dans le cas d'un échelon numérique égal à 5 cl, il convient de prendre des précautions en fin d'essai (incertitude b3).

Pour l'essai à petit débit, la jauge de 5 l ne convient pas dans le cas d'un échelon numérique de 5 cl ou d'un échelon analogique de 2 cl.

Dans le cas d'un échelon numérique de 1 cl ou d'un échelon analogique de 1 cl, la valeur absolue de l'erreur maximale tolérée étant égale à 0,5 %, on s'aperçoit que la tolérance est légèrement dépassée.

Il conviendrait donc de choisir une jauge de plus grand volume. Cependant, s'agissant de vérification périodique, l'incertitude étant composée, en grande partie, de composantes aléatoires, on peut utiliser la disposition 2)* du point 5.1.2 et répéter les mesurages afin d'accepter ou refuser l'instrument en fonction de la tendance des résultats.

* répéter l'essai, dans le document dont est issue la présente annexe.

EXEMPLES DE CALCUL D'INCERTITUDE

essais préliminaires

Date : 15/05/1996

A.5.6/7

Type de l'incertitude	Composante	Variable Xi	Valeur variable	Delta i	Coefficient de sensibilité	Ecart-type Uj	Variance Si
B1	volume (l) jauge (préc. cert. étal.)	Vj	5	2,0E-04	1	1,0E-04	1,0E-08
B2	lecture de la jauge	1/3d	1,0E-03	3,3E-04	1	1,1E-04	1,2E-08
B3	lecture sur compteur (l)	e/3	1,7E-02	3,3E-03	1	1,4E-03	1,9E-06
B4	écart d0 à l'écart périodique (l)	DCj	0,008	1,6E-03	1	8,0E-04	6,4E-07
B5	évaporation (dispersion)	EVj	4,0E-04	4,0E-04	1	1,3E-04	1,8E-08
B6	mouillage de la jauge	mj	1,0E-04	1,0E-04	1	3,3E-05	1,1E-09
B7	influence de la température (°C)	Tj-Tr	10	5,0E-04	1	1,7E-04	2,8E-08
B8	influence de la température (°C)	Tj-Tc	1	1,0E-03	1	3,3E-04	1,1E-07
B9	influence du débit d'essais (%)	Q	5,0E-03	5,0E-03	0	0,0E+00	0,0E+00

* volume jauge (l) : 5
 * jauge en : inox
 * col de jauge : étroit
 * essais sur : livraison minimale
 avec précautions : oui
 * indicateur : électronique
 * échelon (l) : 0,05
 * distorsion (l) : 0,004

Variance composée 2,7E-06

Erreur maximale tolérée : 1,0E-02

Ecart-type composé 1,6E-03

Incertitude globale maximale tolérée : 3,3E-03

Incertitude globale 3,3E-03

-> Convient

Type de l'incertitude	Composante	Variable Xi	Valeur variable	Delta i	Coefficient de sensibilité	Ecart-type Uj	Variance Si
B1	volume (l) jauge (préc. cert. étal.)	Vj	5	2,0E-04	1	1,0E-04	1,0E-08
B2	lecture de la jauge	1/3d	1,0E-03	3,3E-04	1	1,1E-04	1,2E-08
B3	lecture sur compteur (l)	e	5,0E-02	1,0E-02	1	4,1E-03	1,7E-05
B4	écart d0 à l'écart périodique (l)	DCj	0,008	1,6E-03	1	8,0E-04	6,4E-07
B5	évaporation (dispersion)	EVj	4,0E-04	4,0E-04	1	1,3E-04	1,8E-08
B6	mouillage de la jauge	mj	1,0E-04	1,0E-04	1	3,3E-05	1,1E-09
B7	influence de la température (°C)	Tj-Tr	10	5,0E-04	1	1,7E-04	2,8E-08
B8	influence de la température (°C)	Tj-Tc	1	1,0E-03	1	3,3E-04	1,1E-07
B9	influence du débit d'essais (%)	Q	5,0E-03	5,0E-03	0	0,0E+00	0,0E+00

* volume jauge (l) : 5
 * jauge en : inox
 * col de jauge : étroit
 * essais sur : livraison minimale
 avec précautions : non
 * indicateur : électronique
 * échelon (l) : 0,05
 * distorsion (l) : 0,004

Variance composée 1,7E-05

Erreur maximale tolérée : 1,0E-02

Ecart-type composé 4,2E-03

Incertitude globale maximale tolérée : 3,3E-03

Incertitude globale 8,4E-03

-> Ne convient pas

Type de l'incertitude	Composante	Variable Xi	Valeur variable	Delta i	Coefficient de sensibilité	Ecart-type Uj	Variance Si
B1	volume (l) jauge (préc. cert. étal.)	Vj	5	2,0E-04	1	1,0E-04	1,0E-08
B2	lecture de la jauge	1/3d	1,0E-03	3,3E-04	1	1,1E-04	1,2E-08
B3	lecture sur compteur (l)	e	1,0E-02	2,0E-03	1	8,2E-04	6,7E-07
B4	écart d0 à l'écart périodique (l)	DCj	0,008	1,6E-03	1	8,0E-04	6,4E-07
B5	évaporation (dispersion)	EVj	4,0E-04	4,0E-04	1	1,3E-04	1,8E-08
B6	mouillage de la jauge	mj	1,0E-04	1,0E-04	1	3,3E-05	1,1E-09
B7	influence de la température (°C)	Tj-Tr	10	5,0E-04	1	1,7E-04	2,8E-08
B8	influence de la température (°C)	Tj-Tc	1	1,0E-03	1	3,3E-04	1,1E-07
B9	influence du débit d'essais (%)	Q	5,0E-03	5,0E-03	0	0,0E+00	0,0E+00

* volume jauge (l) : 5
 * jauge en : inox
 * col de jauge : étroit
 * essais sur : livraison minimale
 avec précautions : non
 * indicateur : électronique
 * échelon (l) : 0,01
 * distorsion (l) : 0,004

Variance composée 1,5E-06

Erreur maximale tolérée : 1,0E-02

Ecart-type composé 1,2E-03

Incertitude globale maximale tolérée : 3,3E-03

Incertitude globale 2,4E-03

-> Convient

Type de l'incertitude	Composante	Variable Xi	Valeur variable	Delta i	Coefficient de sensibilité	Ecart-type Uj	Variance Si
B1	volume (l) jauge (préc. cert. étal.)	Vj	5	2,0E-04	1	1,0E-04	1,0E-08
B2	lecture de la jauge	1/3d	1,0E-03	3,3E-04	1	1,1E-04	1,2E-08
B3	lecture sur compteur (l)	e/2	1,0E-02	2,0E-03	1	9,4E-04	8,9E-07
B4	écart d0 à l'écart périodique (l)	DCj	0,008	1,6E-03	1	8,0E-04	6,4E-07
B5	évaporation (dispersion)	EVj	4,0E-04	4,0E-04	1	1,3E-04	1,8E-08
B6	mouillage de la jauge	mj	1,0E-04	1,0E-04	1	3,3E-05	1,1E-09
B7	influence de la température (°C)	Tj-Tr	10	5,0E-04	1	1,7E-04	2,8E-08
B8	influence de la température (°C)	Tj-Tc	1	1,0E-03	1	3,3E-04	1,1E-07
B9	influence du débit d'essais (%)	Q	5,0E-03	5,0E-03	0	0,0E+00	0,0E+00

* volume jauge (l) : 5
 * jauge en : inox
 * col de jauge : étroit
 * essais sur : livraison minimale
 avec précautions : sans objet
 * indicateur : mécanique
 * échelon (l) : 0,02
 * distorsion (l) : 0,004

Variance composée 1,7E-06

Erreur maximale tolérée : 1,0E-02

Ecart-type composé 1,3E-03

Incertitude globale maximale tolérée : 3,3E-03

Incertitude globale 2,6E-03

-> Convient

EXEMPLES DE CALCUL D'INCERTITUDE

Date : 15/05/1996

A.5.7/7

Type de l'incertitude	Composante	Variable Xi	Valeur variable	Delta i	Coefficient de sensibilité	Ecart-type Uj	Variance Si
B1	volume (l) jauge (préc. cert. étal.)	Vj	5	2,0E-04	1	1,0E-04	1,0E-08
B2	lecture de la jauge	1/3d	1,0E-03	3,3E-04	1	1,1E-04	1,2E-08
B3	lecture sur compteur (l)	e/3	1,7E-02	3,3E-03	1	1,4E-03	1,9E-06
B4	écart dû à l'écart périodique (l)	DCj	0,008	1,6E-03	1	8,0E-04	6,4E-07
B5	évaporation (dispersion)	EVj	4,0E-04	4,0E-04	1	1,3E-04	1,8E-08
B6	mouillage de la jauge	mj	1,0E-04	1,0E-04	1	3,3E-05	1,1E-09
B7	influence de la température (°C)	Tj-Tr	10	5,0E-04	1	1,7E-04	2,8E-08
B8	influence de la température (°C)	Tj-Tc	1	1,0E-03	1	3,3E-04	1,1E-07
B9	influence du débit d'essais (%)	Q	5,0E-03	5,0E-03	0	0,0E+00	0,0E+00

volume jauge (l) : 5
 jauge en : inox
 col de jauge : étroit
 essais sur : petit débit
 avec précautions : oui
 indicateur : électronique
 échelon (l) : 0,05
 distorsion (l) : 0,004

Variance composée 2,7E-06

Erreur maximale tolérée : 5,0E-03 Ecart-type composé 1,6E-03

Incertitude globale maximale tolérée : 1,7E-03 Incertitude globale 3,3E-03 → Ne convient pas

Type de l'incertitude	Composante	Variable Xi	Valeur variable	Delta i	Coefficient de sensibilité	Ecart-type Uj	Variance Si
B1	volume (l) jauge (préc. cert. étal.)	Vj	5	2,0E-04	1	1,0E-04	1,0E-08
B2	lecture de la jauge	1/3d	1,0E-03	3,3E-04	1	1,1E-04	1,2E-08
B3	lecture sur compteur (l)	e/2	1,0E-02	2,0E-03	1	9,4E-04	8,9E-07
B4	écart dû à l'écart périodique (l)	DCj	0,008	1,6E-03	1	8,0E-04	6,4E-07
B5	évaporation (dispersion)	EVj	4,0E-04	4,0E-04	1	1,3E-04	1,8E-08
B6	mouillage de la jauge	mj	1,0E-04	1,0E-04	1	3,3E-05	1,1E-09
B7	influence de la température (°C)	Tj-Tr	10	5,0E-04	1	1,7E-04	2,8E-08
B8	influence de la température (°C)	Tj-Tc	1	1,0E-03	1	3,3E-04	1,1E-07
B9	influence du débit d'essais (%)	Q	5,0E-03	5,0E-03	0	0,0E+00	0,0E+00

volume jauge (l) : 5
 jauge en : inox
 col de jauge : étroit
 essais sur : petit débit
 avec précautions : oui
 indicateur : mécanique
 échelon (l) : 0,02
 distorsion (l) : 0,004

Variance composée 1,7E-06

Erreur maximale tolérée : 5,0E-03 Ecart-type composé 1,3E-03

Incertitude globale maximale tolérée : 1,7E-03 Incertitude globale 2,6E-03 → Ne convient pas

Type de l'incertitude	Composante	Variable Xi	Valeur variable	Delta i	Coefficient de sensibilité	Ecart-type Uj	Variance Si
B1	volume (l) jauge (préc. cert. étal.)	Vj	5	2,0E-04	1	1,0E-04	1,0E-08
B2	lecture de la jauge	1/3d	1,0E-03	3,3E-04	1	1,1E-04	1,2E-08
B3	lecture sur compteur (l)	e/3	3,3E-03	6,7E-04	1	2,7E-04	7,4E-08
B4	écart dû à l'écart périodique (l)	DCj	0,008	1,6E-03	1	8,0E-04	6,4E-07
B5	évaporation (dispersion)	EVj	4,0E-04	4,0E-04	1	1,3E-04	1,8E-08
B6	mouillage de la jauge	mj	1,0E-04	1,0E-04	1	3,3E-05	1,1E-09
B7	influence de la température (°C)	Tj-Tr	10	5,0E-04	1	1,7E-04	2,8E-08
B8	influence de la température (°C)	Tj-Tc	1	1,0E-03	1	3,3E-04	1,1E-07
B9	influence du débit d'essais (%)	Q	5,0E-03	5,0E-03	0	0,0E+00	0,0E+00

volume jauge (l) : 5
 jauge en : inox
 col de jauge : étroit
 essais sur : petit débit
 avec précautions : oui
 indicateur : électronique
 échelon (l) : 0,01
 distorsion (l) : 0,004

Variance composée 8,9E-07

Erreur maximale tolérée : 5,0E-03 Ecart-type composé 9,5E-04

Incertitude globale maximale tolérée : 1,7E-03 Incertitude globale 1,9E-03 → Ne convient pas

Type de l'incertitude	Composante	Variable Xi	Valeur variable	Delta i	Coefficient de sensibilité	Ecart-type Uj	Variance Si
B1	volume (l) jauge (préc. cert. étal.)	Vj	5	2,0E-04	1	1,0E-04	1,0E-08
B2	lecture de la jauge	1/3d	1,0E-03	3,3E-04	1	1,1E-04	1,2E-08
B3	lecture sur compteur (l)	e/2	5,0E-03	1,0E-03	1	4,7E-04	2,2E-07
B4	écart dû à l'écart périodique (l)	DCj	0,008	1,6E-03	1	8,0E-04	6,4E-07
B5	évaporation (dispersion)	EVj	4,0E-04	4,0E-04	1	1,3E-04	1,8E-08
B6	mouillage de la jauge	mj	1,0E-04	1,0E-04	1	3,3E-05	1,1E-09
B7	influence de la température (°C)	Tj-Tr	10	5,0E-04	1	1,7E-04	2,8E-08
B8	influence de la température (°C)	Tj-Tc	1	1,0E-03	1	3,3E-04	1,1E-07
B9	influence du débit d'essais (%)	Q	5,0E-03	5,0E-03	0	0,0E+00	0,0E+00

volume jauge (l) : 5
 jauge en : inox
 col de jauge : étroit
 essais sur : petit débit
 avec précautions : oui
 indicateur : mécanique
 échelon (l) : 0,01
 distorsion (l) : 0,004

Variance composée 1,0E-06

Erreur maximale tolérée : 5,0E-03 Ecart-type composé 1,0E-03

Incertitude globale maximale tolérée : 1,7E-03 Incertitude globale 2,0E-03 → Ne convient pas

